



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**ZPŮSOBY MONTÁŽE SNÍMAČŮ AKUSTICKÉ EMISE NA  
POVRCH TESTOVANÝCH KONSTRUKCÍ**

METHODS OF MOUNTING OF ACOUSTIC EMISSION SENSORS ON THE SURFACE OF TESTED  
STRUCTURES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jakub Ščasný**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.**

**BRNO 2017**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Jakub Ščasný**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Způsoby montáže snímačů akustické emise na povrch testovaných konstrukcí**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Kvalitní připojení senzorů na povrch zkoušených dílců je jednou ze základních podmínek získání kvalitního signálu akustické emise. V praxi se používá celá řada postupů, které však mají různá omezení a které jsou vhodné pouze pro určité aplikace. Problematické je zejména uchycení na zaoblené povrchy, které nesmí být poškozeny při fixaci snímače.

Typ práce: vývojová - konstrukční

### **Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem práce je na základě kritické rešerše současných možností vyvinout upínací přípravek pro opakovatelné a spolehlivé upínání snímačů AE na potrubí vyrobené z nemagnetických materiálů.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- zpracování přehledu současných postupů upínání snímačů AE,
- provedení a realizace konstrukčního návrhu upínacího prvku,
- ověření funkčnosti a spolehlivosti přípravku, včetně ukázkového snímání dat.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, Joseph E., MISCHKE, Charles R., BUDYNAS, Richard G.: Konstruování strojních součástí. Translation Hartl, M. a kol., překlad 7. vydání, VUTIUM, Brno, 2010, 1160 s., ISBN 978-80-214-2-29-0.

KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav: Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu. BEN-Technická literatura, Praha, 2006, 410 s., ISBN 80-7300-158-6.

SHULL, Peter J.: Nondestructive Evaluation - Theory, Techniques, and Applications. Marcel Dekker, New York, 2002, 844 s., ISBN 0-8247-8872-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

---

## ABSTRAKT

Táto bakalárska práca je zameraná na riešenie problému montáže snímačov akustickej emisie na valcový a guľový povrch skúšaných potrubných segmentov vyrobených z neferomagnetického materiálu. Práca obsahuje prehľad súčasného stavu poznania základov metódy akustickej emisie potrebných na zvládnutie problematiky. V ďalšej časti je spracovaný prehľad postupov používaných pre inštaláciu snímačov. Konštrukčná časť je venovaná návrhom prípravkov pre montáž snímačov na plochy zadaných parametrov, overeniu ich funkčnosti a porovnaní ich vlastností.

## KEÚČOVÉ SLOVÁ

Akustická emisia, montáž snímača, akustická väzba

## ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the issue of mounting acoustic emission sensor to cylindrical and spherical surface of tested tube segments which are made of non-ferromagnetic material. This work includes overview of current state of cognition in the basics of acoustic emission testing needed for understanding the issue. The following part includes the overview of commonly used practices for installing transducers. In the part of mechanical design drafts of mounting fixtures are discussed along with testing and comparison of their characteristics.

## KEYWORDS

Acoustic emission, sensor mounting, acoustic coupling

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠČASNÝ, J. *Způsoby montáže snímačů akustické emise na povrch testovaných konstrukcí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 63 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc..

---



---

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som túto prácu *Způsoby montáže snímačů akustické emise na povrch testovaných konstrukcí* vypracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Pavla Mazala, CSc. a v zozname som uviedol všetky použité zdroje.

V Brne 17.05.2017

.....  
Jakub Ščasný

---





---

## **POĎAKOVANIE**

Chcel by som využiť túto príležitosť a poďakovať vedúcemu práce doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc. za cenné rady ohľadom vypracovania práce. Ďalej by som chcel poďakovať Ing. Vendule Kratochvílovej a Ing. Houssamovi Mahmoudovi za ich pomoc pri tvorbe a testovaní konštrukčných návrhov.

---



**OBSAH**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>OBSAH</b>                                       | <b>11</b> |
| <b>ÚVOD</b>  | <b>13</b> |
| <b>1 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>          | <b>14</b> |
| 1.1 Nedeštruktívne testovanie                      | 14        |
| 1.1.1 Prehľad metód NDT                            | 14        |
| 1.1.2 Normalizácia v NDT                           | 14        |
| 1.1.3 Kvalifikácia personálu                       | 15        |
| 1.1.4 Vizuálna metóda                              | 15        |
| 1.1.5 Kapilárna metóda                             | 15        |
| 1.1.6 Magnetická metóda práškova                   | 16        |
| 1.1.7 Metóda vírivých prúdov                       | 17        |
| 1.1.8 Skúšanie prežarováním                        | 18        |
| 1.1.9 Skúšanie ultrazvukom                         | 18        |
| 1.2 Metóda akustickej emisie (AE)                  | 19        |
| 1.2.1 Zdroj a udalosť AE                           | 20        |
| 1.2.2 Šírenie vln AE v telese                      | 21        |
| 1.2.3 Detekcia vln AE                              | 22        |
| 1.2.4 Úprava a prenos signálu AE                   | 23        |
| 1.2.5 Spracovanie signálu AE meracím systémom      | 23        |
| 1.2.6 Vyhodnotenie parametrov signálu AE           | 24        |
| 1.2.7 Lokalizácia zdrojov AE                       | 25        |
| 1.2.8 Vyhodnotenie zdrojov AE                      | 26        |
| 1.2.9 Vlastnosti metódy akustickej emisie          | 26        |
| 1.2.10 Aplikácie metódy AE                         | 27        |
| 1.3 Snímače akustickej emisie                      | 28        |
| 1.3.1 Piezoelektrické snímače                      | 28        |
| 1.3.2 Piezofilmové snímače                         | 29        |
| 1.3.3 Kapacitné snímače                            | 30        |
| 1.3.4 Elektromagneto-akustické snímače             | 30        |
| 1.3.5 Laserová interferometria                     | 31        |
| 1.3.6 Kalibrácia snímačov                          | 31        |
| 1.4 Montáž snímačov AE                             | 32        |
| 1.4.1 Priama inštalácia snímača na povrch          | 33        |
| 1.4.2 Nepriama inštalácia snímača na povrch        | 33        |
| 1.4.3 Akustická väzba a kontakt snímača s povrchom | 33        |
| 1.4.4 Prípravky pre uchytávanie snímačov k povrchu | 34        |
| <b>2 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>             | <b>38</b> |
| <b>3 KONCEPČNÉ RIEŠENIE</b>                        | <b>40</b> |
| 3.1 Montáž pomocou elastických popruhov            | 40        |
| 3.2 Montáž pomocou prísaviek                       | 42        |
| 3.3 Montáž pomocou pružných strmeňov               | 42        |
| 3.4 Zhrnutie                                       | 43        |
| <b>4 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE</b>                      | <b>45</b> |
| 4.1 Montáž pomocou popruhov                        | 45        |
| 4.2 Montáž pomocou prísaviek                       | 48        |
| 4.3 Praktické overenie funkčnosti prípravkov       | 53        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4 Ukážka nasnímaných dát                             | 53        |
| <b>5 DISKUSIA</b>                                      | <b>56</b> |
| <b>6 ZÁVER</b>   | <b>57</b> |
| <b>7 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>                      | <b>58</b> |
| <b>8 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN</b> | <b>61</b> |
| <b>9 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV</b>                      | <b>62</b> |
| <b>10 ZOZNAM PRÍLOH</b>                                | <b>63</b> |

## ÚVOD

---

V technickej praxi je nedeštruktívne testovanie materiálov dôležitým pilierom kontroly kvality súčiastok a konštrukcií pre ich bezpečnú prevádzku. Vo forme spätnej väzby je tiež zdrojom užitočných informácií pre technológiu výroby. Defektoskopické skúšky môžu byť zaradené ako kontrola polotovarov a obrobkov počas výroby, ako výstupná kontrola hotových výrobkov, taktiež ako detekcia a sledovanie vývinu väd počas prevádzky. Vhodným použitím týchto skúšok sa dá zaručiť dlhodobá kontrola nad kvalitou výroby, životnosť zariadení a hlavne predísť mnohým priemyselným, dopravným a iným katastrofám.

Jednou z metód nedeštruktívneho testovania je metóda akustickej emisie, ktorá so sebou prináša mnohé zaujímavé vlastnosti a možnosti. Hlavnou charakteristikou tejto metódy je, že je použiteľná iba na odhalenie javov v reálnom čase – jedná sa teda o monitorovanie pri zaťažení. Hlavnou podstatou metódy je meranie a vyhodnocovanie vln v materiáli, ktoré sú spôsobené sledovanými dejmi. Pre úspešnosť týchto meraní je nevyhnutné správne snímanie dát, ktoré zabezpečuje snímač akustickej emisie. Ďalším dôležitým predpokladom pre meranie je spoľahlivý kontakt snímača so skúšobným povrchom počas celého merania. Splnenie tejto podmienky musia zaručovať techniky montáže snímačov na povrch založené na rôznych princípoch, ktoré sú sprevádzané svojimi výhodami a obmedzeniami.

## 1 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

### 1.1 Nedeštruktívne testovanie

Nedeštruktívne testovanie (*non-destructive testing* – NDT, defektoskopia) je súbor metód skúšania materiálov bez ich porušenia alebo zmeny ich vlastností, testovania súčiastok a konštrukcií tak, aby po vykonaní skúšky mohli plniť svoju funkciu. Úlohou NDT je detekcia vady (necelistvosti materiálu, zámeny materiálu, nežiadaného deja...), jej zviditeľnenie fyzickou indikáciou alebo charakteristickou výchyľkou priebehu elektrického signálu a následné vyhodnotenie daných nálezov spolu s ich interpretáciou. [1]

#### 1.1.1 Prehľad metód NDT

Rozmanitosť vád, materiálov a aplikácií spolu s rôznymi využiteľnými fyzikálnymi princípmi vedie od začiatku 20. storočia k vzniku početných metód nedeštruktívneho testovania, ktoré sa s vývinom prostriedkov a techniky stále vyvíjajú, zdokonaľujú a lepšie prispôbujú špecifickým aplikáciám. Najbežnejšie rozdelenie základných NDT metód je podľa výskytu vád, na detekciu ktorých sú primárne určené a to na *povrchové metódy* (detekcia vád otvorených na povrch materiálu) a *objemové metódy* (detekcia vád v objeme materiálu) :

- Povrchové metódy : Kapilárna metóda (PT)  
Magnetická metóda práškova (MT)  
Vizuálna metóda (VT)  
Metóda vírivých prúdov (ET)
- Objemové metódy : Skúšanie prežarováním (RT)  
Skúšanie ultrazvukom (UT)

Existujú mnohé ďalšie metódy, ktoré svojou podstatou nezapadajú do daného rozdelenia a tak bývajú často označované ako špeciálne :

- Špeciálne metódy : Metóda akustickej emisie (AE)  
Meranie netesností (LT)  
Meranie hrúbok ultrazvukom (UTT)

Žiadna z metód nie je univerzálna, každá má svoje výhody, nevýhody a obmedzenia. Preto je vždy potrebné na základe skúseností a znalostí rôznych metód vybrať tú správnu pre daný typ aplikácie. Po zvolení metódy je potrebné stanoviť konkrétnu techniku (metodiku) pre daný výkon a dôležité parametre skúšky. Všetky tieto predpoklady pre úspešné použitie defektoskopickú skúšky definuje *postup NDT*, z ktorého je následne vypracovaná *inštrukcia NDT*. Inštrukcia už obsahuje postupnosť konkrétnych krokov skúšky s informáciami pre personál NDT, ktorý skúšku vykonáva. [1,2,3]

#### 1.1.2 Normalizácia v NDT

Normalizácia zohráva významnú rolu vo svete NDT. Existuje množstvo noriem popisujúcich skúšky jednotlivými metódami, spôsoby vyhodnotenia indikácií, kritéria definujúce prípustnosť indikácií, taktiež normy popisujú kvalifikáciu

a certifikáciu personálu a mnoho ďalšieho. Tieto normy slúžia ako jazyk, ktorý exaktne popisuje prístup k danej problematike, a môžu tak slúžiť ako vodítko pre výkon defektoskopických skúšok a úkonov s nimi spojených. Často sa na ne odvolávajú kontrakty o výkonoch testov, ktoré ich učiňujú záväznými. Výnimkou sú napríklad normy pojednávajúce o skúšaní tlakových nádob, ktoré sú záväzné zo zákona.

### 1.1.3 Kvalifikácia personálu

1.1.3

---

Pri návrhu aj výkone NDT kontroly ktoroukoľvek metódou sa pracuje s fyzikálnymi zákonitostami a princípmi, na ktorých je daná metóda založená. Pre relevantnosť každej skúšky sú preto nevyhnutné vedomosti a zručnosti pracovníkov v danej metóde, ktoré musia byť preukázateľné. Kvalifikácia a certifikácia NDT pracovníkov pre návrh a výkon kontroly je definovaná normami a rozdelená do troch stupňov (Level I, Level II, Level III) pre každú metódu zvlášť. [2,3]

### 1.1.4 Vizuálna metóda

1.1.4

---

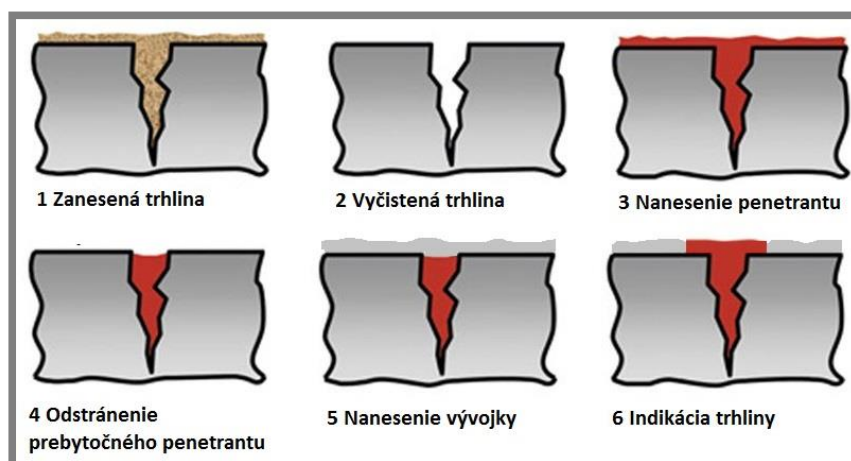
Vizuálna metóda ( VT – Visual Testing) je základnou NDT metódou, ktorá predstavuje inšpekciu povrchu materiálu ľudským zrakom. Podľa prístupnosti kontrolovaného povrchu sa dá rozdeliť na *priamu* (kontrola voľným okom, prípadne s použitím lupy alebo zrkadla) a *nepriamu* (pre inšpekciu povrchu je potrebné využiť špeciálne zariadenia ako endoskopy, boroskopy atď.). Okrem hľadania necelistvostí v materiáloch zahŕňa aj posudzovanie stavu povrchu a tvarových odchýlok výrobkov (napríklad pri kontrole zvarov sú to trhliny, studené spoje, póry a pod. ale aj rozstrek, prevarenie koreňa, presadenia atď.). Pre úspešné vykonanie skúšky s relevantnými výsledkami a dostatočnou citlivosťou musí byť kladený dôraz na dostatočné očistenie povrchu pred skúškou a jeho predpísané osvetlenie. Výhodou priamej vizuálnej metódy je nízka cena, preto by jej použitie malo byť vždy zvážené pred voľbou náročnejších metód. [1,4,5]

### 1.1.5 Kapilárna metóda

1.1.5

---

Kapilárna metóda (PT – Penetrant testing) využíva kapilárne vlastnosti kvapalín – vzĺnavosť a zmáčavosť. Princíp skúšky sa dá popísať v niekoľkých krokoch: na očistený povrch súčiastky je nanosený vhodný penetrant (kvapalina s vysokou vzĺnavosťou a malým kontaktným uhlom – dobrou zmáčavosťou povrchu), ktorý preniká do necelistvostí otvorených na povrch a vyplňa ich objem. Po uplynutí dostatočného času na penetráciu je prebytočný penetrant z povrchu odstránený tak, aby zostal iba v defektoch. Nasleduje nanosenie vývojky, ktorá slúži ako absorpčná vrstva, do ktorej vzlína penetrant z necelistvostí a vytvára tak indikácie, ktoré sú vyhodnotené po uplynutí vyvolávacieho času. Vývojka slúži aj ako biele kontrastné pozadie voči sýto sfarbenému penetrantu – jedná sa o metódu *farebnú*. Pri použití fluorescenčného penetrantu (vyhodnotenie indikácií v tmavej komore s dostatočným výkonom UV žiarenia) je vytvorený kontrast žltozelených indikácií na tmavofialovom pozadí a metóda sa nazýva *fluorescenčná*. [1,4,6]



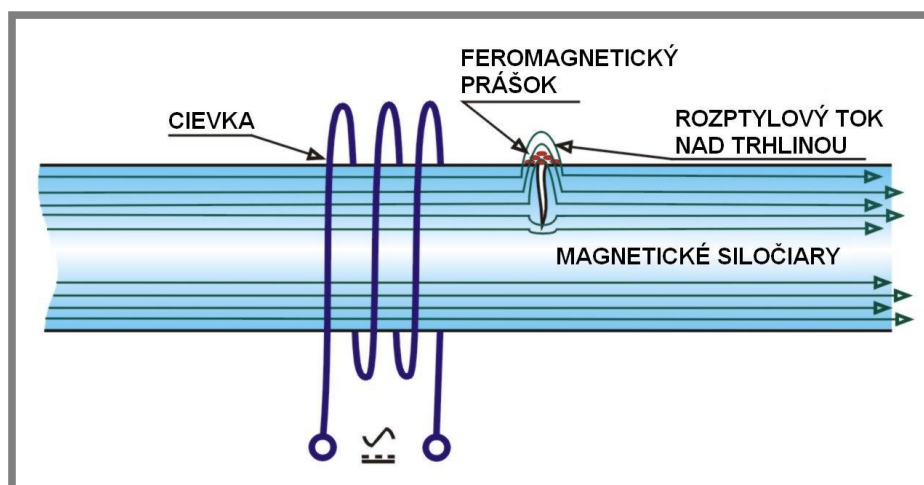
Obr. 1.1.5-1 Princíp metódy PT [7]

Na citlivosť metódy má zásadný vplyv drsnosť povrchu a jeho dôkladné očistenie a odmastenie pred skúškou. Výhodou tejto metódy je jej principiálna jednoduchosť – na vykonanie jednoduchej kontroly súčiastky je potrebný iba set chemických prípravkov (čistič, penetrant, vývojka – vo forme sprejov) a jednoduché pomôcky. Bez nutnosti použitia akýchkoľvek zariadení je možné takúto skúšku vykonať kdekoľvek. Pre sériovú kontrolu súčiastok sú používané kapilárne linky, ktoré sú navrhnuté s účelom čo najvyššej efektívnosti a produktivity testovania. Metódu je možné aplikovať na akýkoľvek neporézny materiál, ktorý nebude poškodený použitými chemickými prípravkami. [1,4,6]

### 1.1.6 Magnetická metóda prášková

Magnetická metóda prášková (MT – Magnetic particle Testing) svojou podstatou využíva fyzikálny jav zvaný *rozptylové magnetické pole*. Ak je súčiastka dostatočne nasýtená magnetickým poľom, tak sa každá nečistota materiálu správa ako prekážka jeho šíreniu – defekt tvorí prostredie s oveľa nižšou permeabilitou (vzduch/plyn v defekte, struska, vmestky...) ako základný kov a tak ho magnetické pole obchádza. Ak sa vada nachádza na povrchu alebo tesne pod povrchom, siločiar magnetického poľa sú v jej okolí nútené vystúpiť až nad povrch súčiastky. Toto jemné magnetické pole sa nazýva rozptylové pole (rozptylový tok) a je potrebné ho indikovať. Pri magnetickej metóde práškovej je to pomocou feromagnetických práškov najčastejšie v suspenzii s vhodnou kvapalinou (napríklad na báze petroleju). Nosná kvapalina má za úlohu zmáčat povrch súčiastky aby po ňom mohol prášok jednoducho klzať priťahovaný rozptylovým tokom a formovať tak indikáciu nad potenciálnou vadou. Pre detekovateľnosť vady je potrebné, aby bola orientovaná približne kolmo na smer šírenia magnetického poľa. Táto podmienka je splnená pri magnetizácii súčiastky dvomi na seba kolmými poľami. [1,4,8]





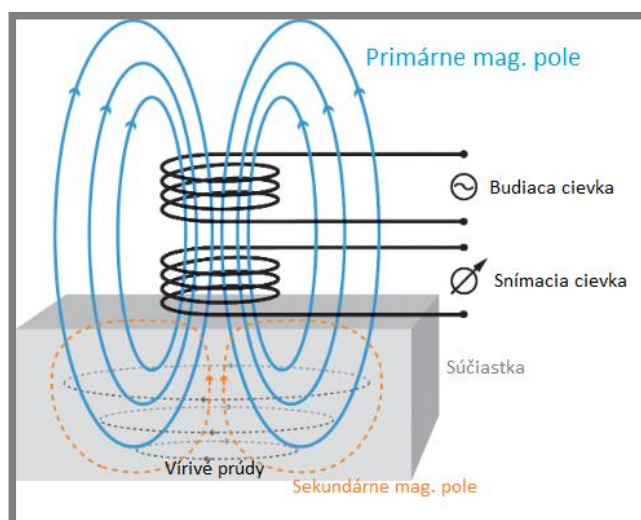
Obr. 1.1.6-1 Princíp metódy MT [8]

Magnetizácia môže byť vykonaná buď ručnými elektromagnetmi, alebo pomocou komplexných zariadení pre magnetizáciu a výkon MT. Použitelnosť tejto metódy je princípom obmedzená na testovanie feromagnetických materiálov, jedná sa o najpoužívanejšiu NDT metódu často aplikovanú najmä v automobilovom priemysle, pre jej možnosť automatizácie. Pri použití tejto metódy je potrebné myslieť na následnú demagnetizáciu súčiastky po vykonaní skúšky, aby zvyškové pole nemohlo negatívne ovplyvniť jej ďalšie použitie. [1,4,8]

### 1.1.7 Metóda vírivých prúdov

1.1.8

Metóda vírivých prúdov (ET – Eddy Current Testing) je povrchová metóda založená na skutočnosti že vady materiálu (diskontinuity, nehomogenity, odchýlky od predpísaného chemického zloženia a iné) spôsobujú zmeny elektrickej vodivosti súčiastky. Princíp skúšky je založený na sledovaní odozvy materiálu na magnetické budenie: Snímač (sonda) obsahuje budiacu a snímaciu cievku. Budiaca cievka (napájaná striedavým napätím vysokých frekvencií) vytvára primárne magnetické



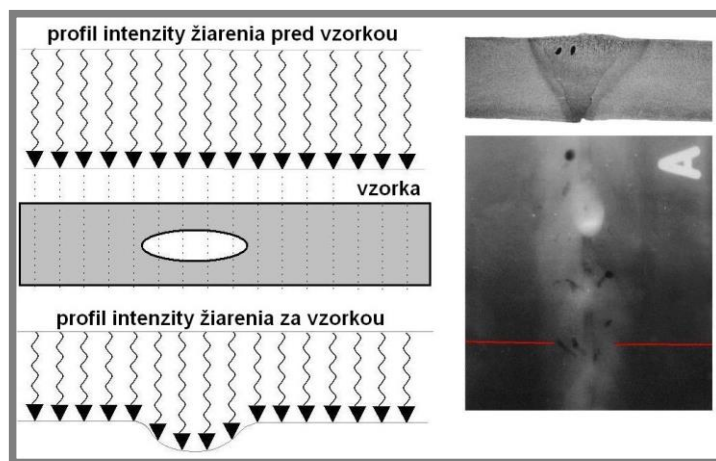
Obr. 1.1.7-1 Princíp metódy ET [9]

pole vyvolávajúce v materiáli súčiastky *vírivé prúdy*. Tieto prúdy tiež okolo seba vytvárajú magnetické pole (sekundárne), ktoré je vektorovo orientované proti primárnemu. Výsledné pole je daná vektorovým súčtom primárneho a sekundárneho a indukuje v snímačej cievke sondy signálové napätie. Sledujú sa odchýlky v priebehu signálu od kalibračných hodnôt.

Využitie tejto metódy je obmedzené na elektricky vodivé materiály. Používa sa aj na kontrolovanie hrúbky ochranných povlakov a náterov, či na kontrolu chemického zloženia a tepelného spracovania. [1,4,10]

### 1.1.8 Skúšanie prežarovaním

Rádiografia (RT – Radiographic Testing) je objemovou metódou NDT, ktorá je založená na schopnosti materiálu znižovať intenzitu prechádzajúceho ionizujúceho žiarenia. Objemová vada spôsobuje, že na jej mieste je intenzita žiarenia menej tlmená (alebo viac – napríklad volfrámové vmestky) v dôsledku menšieho objemu materiálu, ktorý musí žiarenie prekonať. Intenzita žiarenia za materiálom je snímaná najčastejšie rádiografickým filmom, ktorý pri dopadaní žiarenia tmavne – indikácie



Obr. 1.1.8-1 Princíp metódy RT [11]

necelistvostí sa zobrazia tmavé na bledšom pozadí spôsobenom okolitým materiálom. V súčasnosti sa rozširujú aj technológie digitálneho snímania žiarenia za prežarovaným telesom. Metóda je vhodná na detekciu objemových vád v celom priereze aj tvarovo veľmi náročných súčiastok, možnosť nálezu plošných vád je obmedzená. Vďaka faktu, že je vyhodnocovaný film, je skúška touto metódou dobre preukázateľná a archivovateľná. To sa využíva najmä pri testovaní rizikových súčiastok a konštrukcií ako napr. tlakových nádob. [1,4,11]

### 1.1.9 Skúšanie ultrazvukom

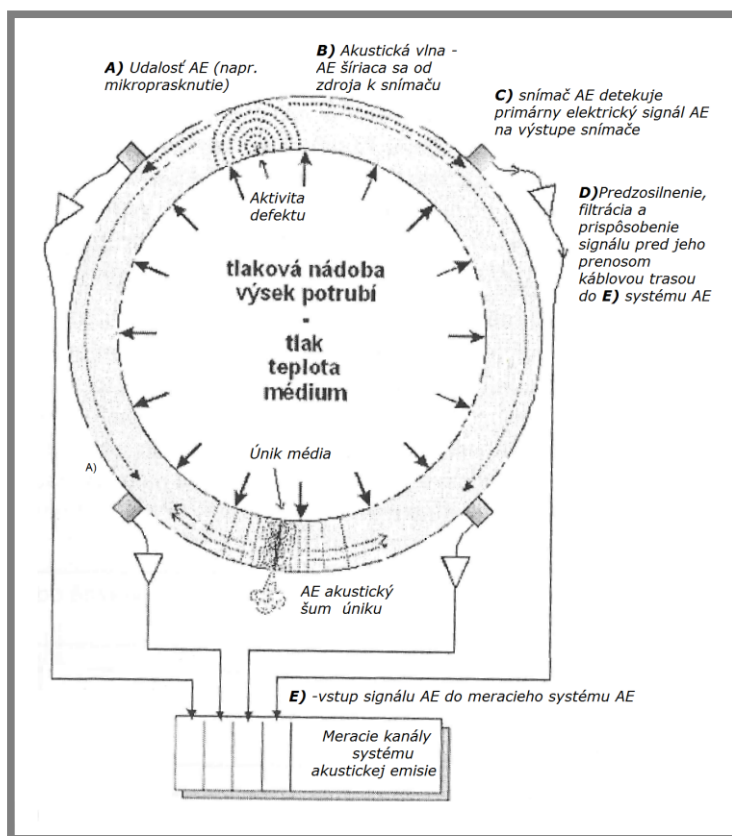
Ultrazvuková metóda (UT – Ultrasonic Testing) využíva princípy šírenia, lomu a odrazu ultrazvukových vln (0,5-25MHz) v tuhom prostredí materiálu. Princípiálne sa jedná o fakt, že necelistvosť na povrchu alebo v objeme materiálu (objemová aj plošná vada) bráni šíreniu ultrazvukových vln, ktoré sa od nej odrážajú. Najjednoduchšie techniky tejto metódy sú *odrazová* a *prechodová*. Pri odrazovej metóde vysiela sonda do materiálu vlny a sníma ich odrazy (echá) naspäť do sondy. Ak v materiáli nie je necelistvosť, tak je zosnímané iba *vstupné a koncové echo*, od

prípadnej vady sa vlnenie odráža a medzi vstupným a koncovým echom je zaznamenané *chybové echo* vadu indikujúce. Pri prechodovej metóde sú umiestnené dve sondy oproti sebe cez hrúbku materiálu – jedna ako vysielateľ druhá ako senzor. Prvá sonda vyšle ultrazvukový zväzok do materiálu a druhá sníma signál, vlnenie, ktoré cez materiál prejde. Prípadné zoslabenie signálu (markantnejšie ako jeho útlm) je považované za indikáciu vady. V súčasnosti sa často používajú sofistikované techniky ako Phased Array a TOFD (meranie doby prechodu difrakčných vln). [1,4,12]

## 1.2 Metóda akustickej emisie (AE)

Ako „akustická emisia“ je označovaný fyzikálny jav emisie akustických prasknutí či šumu ako dôsledku uvoľňovania elastickej energie pri plastickej deformácii. Snímanie takýchto signálov pomáhalo získavať informácie o sprievodných procesoch plastickej deformácie. Metódou akustickej emisie nazývame spôsob snímania, spracovania a vyhodnotenia dát o AE. Okrem akustickej emisie sprevádzajúcej plastickej deformáciu umožňuje sledovať početné deje v materiáloch ako napríklad vývoj porušovania, úniky médií, trecie procesy či sledovanie technologických procesov.

Najjednoduchším vysvetlením akustickej emisie je analógia s praskaním dreva pri jeho lámaní – prasknutie konára je sprevádzané mechanickými kmitmi, ktorých frekvenčné pásmo spadá do oblasti, ktorú je schopné počuť ľudské ucho. Praskanie konára sa však dá oveľa citlivejšie snímať priamo na povrchu konára, kde nedochádza k skresleniu a útlmu kmitov prenosom medzi viacerými rozhraniami a šírením riedkym prostredím akým je vzduch. [1,13]



Obr. 1.2-1 Prenosová trasa AE A) až E) [1]

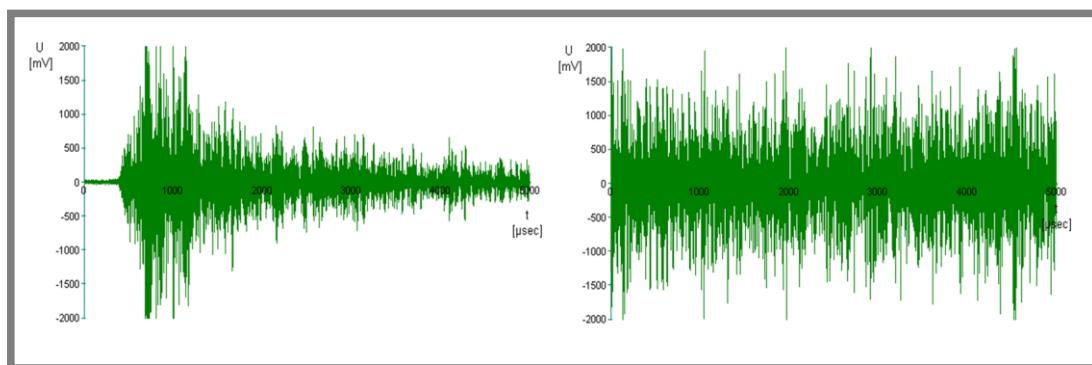
Pri postupe defektu (napr. pri šírení trhliny) sa v jeho okolí uvoľňuje deformačná energia spôsobujúca vznik elastických vln, ktoré sa šíria a odrážajú v materiáli. Vlnenie je detekované na povrchu telesa spravidla niekoľkými snímačmi, ktoré výchylku povrchu menia na elektrický signál. Daný signál je upravený a vedený do meracieho systému AE. Merací systém signál ďalej elektronicky spracuje a zobrazí spravidla ako priebeh výchylky v čase. Nasleduje vyhodnotenie a interpretácia spracovaných dát.

V praxi často metóda AE poskytuje informácie pre nasmerovanie iných NDT metód pre jednoduchšie zrealizovateľnú, presnejšiu lokalizáciu a kvantifikáciu vady. [1]

### 1.2.1 Zdroj a udalosť AE

Na začiatku celej série procesov, na ktorých je založená metóda akustickej emisie musí byť objekt záujmu, ktorý tvorí podstatu celého merania – zdroj akustickej emisie, ktorý sa snažíme detekovať. Je to fyzikálny pôvod procesov, ktoré vedú k vysielaniu vln AE. Udalosť akustickej emisie je samotný fyzikálny dej, ktorý reprezentuje dynamický ráz vytvárajúci akustickú emisiu. Napríklad trhlina alebo plastická deformácia je zdrojom a poskočenie čela trhliny či preskok dislokácie je udalosť AE. Ďalším príkladom je únik média pod tlakom kedy je zdrojom netesnosť a udalosťou sú turbulencie a tlakové výkyvy v štrbine spôsobujúce šum.

Akustická emisia môže byť spojitá, alebo rázová (praskavá). Ak sa v detekovanom signáli dajú jasne časovo rozlíšiť jednotlivé rázy (hity) udalostí, hovoríme o praskavom signáli. Postupnosť častých hitov, ktoré sa navzájom časovo prekrývajú a zlievajú tvorí spojitý signál AE. [1,13]

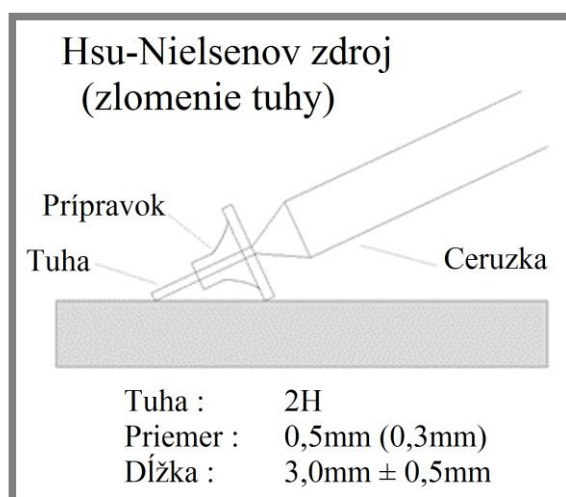


Obr. 1.2.1-1 Praskavý (vľavo) a spojitý (vpravo) signál AE [14]

Metóda akustickej emisie deteguje aktivitu väd, preto je meranie vždy vykonávané pri zaťažení sledovaného objektu (za bežnej prevádzky, alebo pri skúšobných zaťaženiach napríklad pri tlakovej skúške nádob). [1]

#### Hsu-Nielsonov zdroj

Jedná sa o základný kalibračný zdroj AE – takzvaný pentest. Test je založený na reprodukovateľnosti akustickej emisie zlomenia tuhy mechanickej ceruzky. Reprodukovateľnosť je zaručená prípravkom, ktorý podopiera vývod tuhy o povrch tak, aby bol pri zlomení vždy rovnaký uhol medzi tuhou a povrchom (pri definovanom vysunutí tuhy cca 3mm). Definovaný je tiež typ použitej tuhy tj. tvrdosť 2H a priemer 0,5 alebo 0,3 milimetra. [1,13,15]



Obr. 1.2.1-1 Hsu-Nielsenov zdroj – pentest [15]

Výhodou pentestu oproti iným možným zdrojom (lom sklenenej kapiláry napovrchu, poklepnutiam o povrch rôznymi tyčinkami atď.) je okrem reprodukovateľnosti aj krátka doba trvania vytvoreného pulzu (okolo 10 ns). [1]

### 1.2.2 Šírenie vln AE v telese

1.2.2

Udalosť akustickej emisie vyvoláva v materiáli elastický napäťový pulz, ktorý sa ďalej šíri, a rozvíja – jedná sa o šírenie elastickej dynamickej napätosti telesom. Úplný popis tohto deja v čase je veľmi náročný, preto existujú zjednodušené reprezentácie danej problematiky.

#### Lúče a vlnoplochy

Názorným popisom sú lúče a vlnoplochy, ktoré sa bežne používajú pre zobrazenie a pochopenie šírenia vln v telese. Pri použití tejto predstavy je potrebné si uvedomiť, že lúče a vlnoplochy sa skladajú z vln rôznych frekvencií, preto je daná reprezentácia iba približná. [1]

Pojem vlnoplocha bol definovaný holandským vedcom Christiaanom Huygensom, ktorý formuloval princíp šírenia vln (známy ako Huygensov princíp) v priestore. Tento princíp hovorí, že každý bod, do ktorého dospelo vlnenie v určitom časovom okamihu sa sám stane zdrojom elementárneho vlnenia, ktoré sa šíri všetkými smermi s rovnakou rýchlosťou vo forme guľovej vlnoplochy. Výsledné čelo postupu vlnenia - vlnoplocha v ďalšom časovom okamihu tvorí obálku sekundárnych vlnoplôch.

Lúč je normála k vlnoploche v ktoromkoľvek jej bode a predstavuje smer šírenia vlny v danom bode. [16]

#### Priečne a pozdĺžne vlnenie

Mechanické vlnenie sa dá rozdeliť na priečne a pozdĺžne. O priečnom (transverzálnom – T vlna, šmykovom) vlnení hovoríme vtedy, keď je smer výchylky sledovaného bodu kolmý na smer šírenia vlny. Názorným príkladom tohto vlnenia je vlna šíriaca sa lanom po švihnutí jeho koncom. Pri pozdĺžnom (longitudinálnom) vlnení je smer výchylky so smerom šírenia vlny rovnobežný a dochádza pri ňom k zhutňovaniu a riedeniu prostredia, ktorým sa šíri (nazýva sa aj dilatačné, D vlny). Tento typ vlnenia je napríklad šírenie zvuku vzduchom. [1,17]



Reálny postup vlny v telese je spravidla tvorený kombináciou týchto druhov vlnenia závisiacich aj na priestorovej konfigurácii a rozmeroch telesa vzhľadom k vlnovej dĺžke. Napríklad pri priečnom vlnení na okraji polopriestoru sa po kruhových vlnoplochách šíria povrchové Rayleighove vlny (R vlny). Tento typ vlnenia vzniká pri buzení povrchu telesa – vlnenie vodnej hladiny. [1]

#### Postupné a stacionárne vlnenie

Iným spôsobom sa dá vlnenie rozdeliť na postupné a stacionárne. Pozdĺžne aj priečne vlny patria medzi vlny postupné, pretože sa v čase plynule šíria telesom, alebo priestorom. Stojaté vlnenie vzniká vhodnou superpozíciou viacerých vlnení (napríklad dve rovnaké postupné vlny s opačným smerom šírenia) a jeho charakteristickými znakmi sú uzlové body, v ktorých je výchylka v čase nulová a kmitne – body s najväčšou výchylkou. [1,17]

Dôležitým javom šírenia vln AE je pokles akustického tlaku v závislosti na vzdialenosti od zdroja, ktorý udáva možný dosah detekcie akustickej emisie. Základné mechanizmy tohto poklesu intenzity sú dané najmä vlastnosťami a štruktúrou materiálu, geometriou súčiastky (otvory, členitosť, stav povrchu...) či okolitým prostredím. *Rozptyl energie* je mechanizmus poklesu hustoty energie so vzdialenosťou od zdroja - celková energia pulzu je nemenná, ale s nárastom objemu vlnoplochy klesá jej intenzita. *Útlm (disipácia) energie* je daný zmenou časti energie na jej iné formy, alebo jej rozptýlením na nerovnostiach povrchov či nehomogenitách štruktúry. Útlm je často závislý na frekvencii a tým mení výsledné frekvenčné spektrum pulzu aj jeho tvar. Ďalší mechanizmus je *rozpad (disperzia) pulzu*, ktorý charakterizuje rozťahnutie pôvodne krátkeho, ostrého pulzu na dlhší časový okamih so znížením jeho amplitúdy. Pokles intenzity vln AE môže byť spôsobený aj geometrickou členitosťou materiálu – vznik akustického tieňa za prekážkou. Pri aplikáciách merania AE v stenách nádoby naplnenej kvapalinou (potrubie, tlaková nádoba...) odoberá kvapalina pri kontakte so stenou časť energie vlnenia. Vplyv tohto javu na pokles intenzity je nepriamo úmerný hrúbke materiálu v styku s kvapalinou. Pri tenkostenných nádobách tak kvapalina môže stať nositeľom intenzívnejšieho vlnenia, než stena nádoby, v ktorej vznikla udalosť AE. [1,13]

#### Difúzne akustické pole

Pri spojitý udalosti AE vzniká šum, ktorého správanie sa výrazne líši od šírenia jednotlivých pulzov. Šum postupne vyplňa teleso, odrazmi a superpozíciou vzniká akustické pole, ktoré je detekovateľné na väčšie vzdialenosti ako pulzy praskavej AE. Ďalšou výhodou spojitého šumu je, že sa dostane aj do miest akustických tieňov a postupne prekoná rôzne geometrické prekážky. [1]

### 1.2.3 Detekcia vln AE

Ďalším krokom v postupnosti fáz metódy merania akustickej emisie, je snímanie vln AE. Detekcia je realizovaná snímačom, ktorý pracuje s výchylkou povrchu, ktorú mení na priebeh napätia – signál. Existujú rôzne druhy snímačov AE, najbežnejší je piezoelektrický. Pre získanie relevantných výsledkov merania musí byť použitý adekvátny snímač s ohľadom na jeho fyzikálne vlastnosti, prechodové charakteristiky a použiteľnosť v daných podmienkach (napr. pri zvýšenej teplote). Pri snímačoch AE je kľúčová ich vysoká citlivosť – schopnosť meniť jemné

výchyľky povrchu na rozpoznateľne veľké napätia. Piezoelektrické snímače sú schopné meniť pikometrické posuvy na napätia desiatok až stoviek  $\mu\text{V}$ . Charakteristiky snímačov sú stanovené a overované kalibráciou, ktorej princíp spočíva v meraní odozvy snímača na definované mechanické budenie. [1,13,18]

### 1.2.4 Úprava a prenos signálu AE

1.2.4

---

Výstupné napätie zo snímača je veľmi malé, je preto nevyhnutné ho zosilniť a upraviť ešte pred jeho vedením káblovou trasou. Za týmto účelom je v bezprostrednej blízkosti snímača zaradený predzosilňovač, ktorý zosilňuje napätie signálu, filtruje nechcené frekvencie a upravuje jeho impedanciu pre vedenie káblom a vstup do systému. Zosilnenie býva obvykle v rozsahu 10 až 60dB v závislosti od citlivosti detekcie a degradačných vlastnostiach signálu pri vedení káblom (rušenie signálu). Výsledné frekvenčné pásmo sa pohybuje rádovo v stovkách kHz opäť v závislosti od konkrétnej aplikácie. Predzosilňovač môže byť konštrukčne priamo súčasťou snímača - snímač s integrovaným predzosilňovačom. Napájanie tohto prvku je realizované obvykle z meracieho systému AE tým istým káblom, ktorým je vedený signál.

Káblová trasa, ktorá vedie upravený signál AE do meracieho systému môže byť dlhá desiatky až stovky metrov. Musí zabezpečiť prenos dát s čo najmenšími deformáciami a skresleniami, taktiež chrániť signál pred možnými vonkajšími interferenciami. Pre tieto účely sa obvykle používajú tienené koaxiálne káble avšak aj tak je potrebné sa vyhnúť vedeniu popri zariadeniach a iných vedeniach, ktoré okolo seba vytvárajú elektromagnetické polia vedúce k rušeniu.

Pri každom meraní je detekované šumové pozadie, ktoré má charakter spojitého signálu a je zapríčinené mechanickými či elektromagnetickými vplyvmi okolia či kludovým elektrickým šumom prístrojov. Aby meranie mohlo byť relevantné musí signál akustickej emisie rozlíšiteľne vystupovať nad úroveň tohto šumu. [1,13,18]

### 1.2.5 Spracovanie signálu AE meracím systémom

1.2.5

---

Po privedení signálu do meracieho systému AE nasleduje jeho finálna úprava. Moderné systémy často signál najskôr zdigitalizujú vysokými vzorkovacími frekvenciami a ďalej s ním pracujú procesory ako pri úprave, tak pri spracovaní a vyhodnotení. Úprava spočíva v konečnej filtrácii frekvenčného spektra signálu a prispôbení veľkosti jeho amplitúdy pre vyhodnocovaciu jednotku. To môže znamenať ďalšie zosilnenie signálu popripade jeho atenuáciu.

Analyzátory sa skladajú z rôzneho počtu kanálov upravujúcich signál z jednotlivých snímačov a ďalších meracích či komunikačných kariet. Všetky časti sú spolu s riadiacou jednotkou modulu prepojené dátovou zbernicou, ktorá zastrešuje prenos dát a časovú synchronizáciu. Pre rozsiahlejšie merania sa používajú modulárne zariadenia, ktoré umožňujú pospájanie viacerých jednotiek (boxov) a komunikačného modulu s počítačom do kompletného systému pre meranie AE. Týmto spôsobom je možné pospájať systém s požadovaným počtom meracích kanálov, vstupmi pre meranie sprievodných veličín atď. V každej reťazi modulov sa musí nachádzať komunikačná jednotka, ktorá tvorí rozhranie medzi meracím systémom a riadiacim počítačom. Okrem týchto rozsiahlych meracích zariadení existujú aj kompaktnějšíe analyzátory, ktoré majú spravidla niekoľko kanálov pre signál AE, aspoň jeden pre pomocnú veličinu a zabudované rozhranie pre priame pripojenie PC a prenos dát. [19]

### 1.2.6 Vyhodnotenie parametrov signálu AE

Pri vyhodnotení signálu AE sa pracuje s jeho definovanými parametrami, ktoré signál charakterizujú a kvantifikujú. Pre rozdielny charakter spojitého a praskavého signálu AE sa líši aj prístup, akým je vyhodnocovaný :

#### Parametre spojitého signálu

Pri vyhodnocovaní spojitého signálu sú parametre stanovené na zvolenom časovom úseku  $\Delta T$  ako stredné hodnoty. Medzi základné parametre patria :

**RMS** (Root mean square) – efektívna hodnota energie signálu slúži k vyhodnoteniu jeho výkonu.  $MRS^2$  charakterizuje celkovú energiu signálu za zvolený časový úsek  $\Delta T$  takže jeho výkon.

**ASL** (Average signal level) – stredná úroveň absolútnej hodnoty úrovne signálu

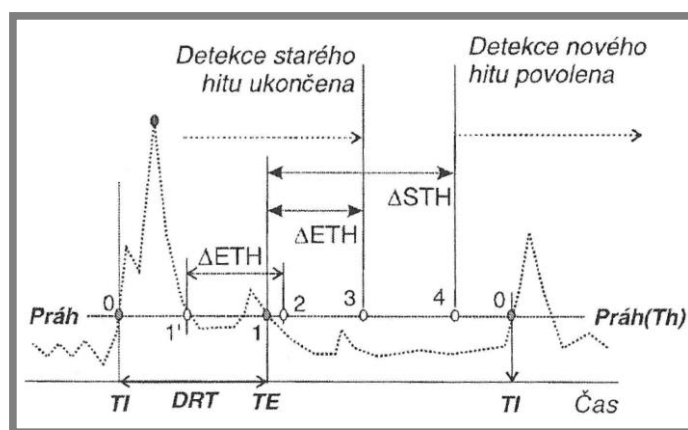
**NC** – počet prekmitov signálu nad nastavenú prahovú hodnotu za uvažovaný časový úsek  $\Delta T$ .

**Amplitúdové spektrum** – početnosť prekmitov signálu nad viacero prahov s odstupňovanou úrovňou.

**Frekvenčné spektrum** vypovedá o frekvenčnom zastúpení spojitého signálu v uvažovanom rozsahu filtrácie. [1]

#### Parametre hitu signálu

Pri detekcii signálu praskavej AE je potrebné hity najskôr rozlíšiť od šumového pozadia. Na to slúži **prah detekcie TH** (Treshold), ktorý udáva hranicu výchylky nastavenú nad kludový šum – každé jeho prekročenie indikuje prítomnosť hitu. Ďalej je potrebné hity medzi sebou separovať – odlíšiť ktoré prekmity nad prah sú súčasťou jedného hitu a ktoré už tvoria nový. Toto je dosiahnuté nastavením hodnôt časov  $\Delta ETH$  (End treshold) a  $\Delta STH$  (Separation treshold).  $\Delta ETH$  udáva čas od poklesu posledného kmitu v hite pod prahovú hodnotu počas ktorého je ešte daný hit snímaný.  $\Delta STH$  je nastavený čas od poklesu signálu pod prah, počas ktorého prah nesmie byť znovu prekročený, aby sa začalo snímanie ďalšieho separátneho hitu – tzv. mŕtvy čas. [1]



Obr. 1.2.6-1 Parametre separácie hitov signálu [1]

Nasleduje určenie parametrov jednotlivých hitov :

**TI** – čas začiatku hitu – čas prvého prekročenia prahu v rámci daného hitu.

**TE** – čas konca hitu – čas posledného poklesu signálu pod prah v rámci daného hitu.

**TM** – čas maximálnej amplitúdy hitu

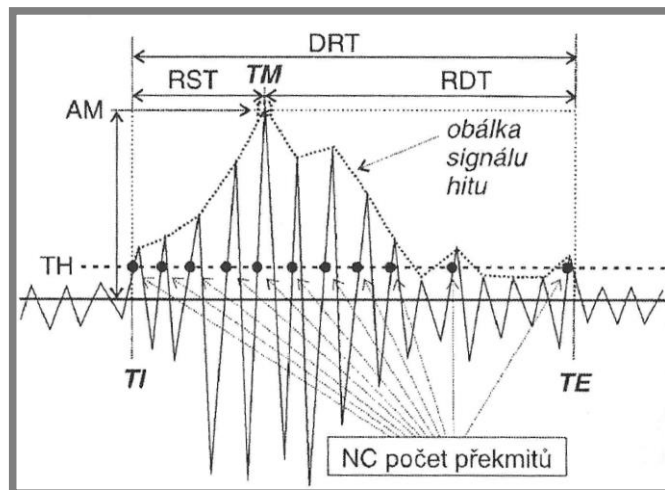


**AM** – hodnota maximálnej amplitúdy hitu

**RST** (Risetime) – doba nábehu hitu od TI po TM

**RDT** (Ringdown time) – doba doznievania hitu od TM po TE

**DRT** (Duration) – doba trvania hitu od TI po TE. Rovná sa súčtu RST a RDT. [1,20]

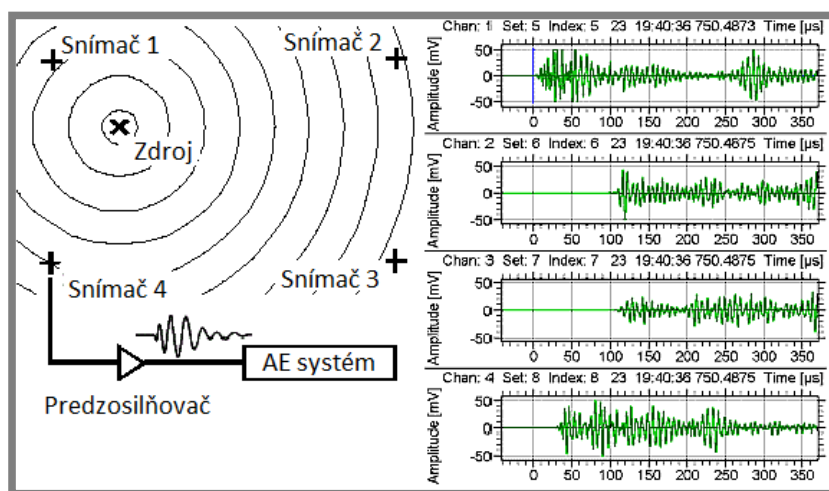


Obr. 1.2.6-2 Parametre hitu [1]

### 1.2.7 Lokalizácia zdrojov AE

Väčšina meraní metódou AE je vykonávaná pomocou siete snímačov – to umožňuje určiť polohu zdroja udalostí. Lokalizácia je principiálne založená na tom, že každú udalosť AE detegujú viaceré snímače v sieti. Signál hitu tej istej udalosti z rôznych snímačov sa líši v dôsledku ich rozdielnej vzdialenosti od zdroja oneskorením, amplitúdou (útlm materiálu) a predĺžením doby trvania. S narastajúcou vzdialenosťou snímača od zdroja sa ostrý, krátko trvajúci hit s vysokou amplitúdou postupne rozmazáva až pod prahovú hodnotu detekcie. Je potrebné odseparovať hity jednotlivých udalostí a udalosti jednotlivých zdrojov. Z časového oneskorenia hitov udalosti od snímačov sa vypočíta lineárna lokalizácia na základe poznatku, že vlna akustickej emisie udalosti sa od jej zdroja šíri rovnakou rýchlosťou do všetkých smerov (ku všetkým snímačom). [1,21]

1.2.7



Obr. 1.2.7-1 Princíp lokalizácie zdroja AE [21]

Pre každú udalosť sa vypočítaná poloha zaznamenaná napríklad do súradníc poloha - amplitúda a na konci merania sa dáta štatisticky vyhodnotia – miesta s najvyššou hustotou udalostí a najvyššími amplitúdami indikujú zdroje AE. Rovnakou metódou sa dá určiť poloha v sieti snímačov v rovine, či na rôznych tvarových prvkoch, ktorých povrch sa pomyselne rozvinie do roviny. [1,21]

---

### 1.2.8 Vyhodnotenie zdrojov AE

Vyhodnotenie a interpretácia nameraných dát je poslednou etapou v postupnosti procesu metódy merania AE. Záver merania je potrebné vyvodiť komplexne s uvažovaním nielen nameraných dát, ale všetkých poznatkov týkajúcich sa tej konkrétnej aplikácie. Ohľad treba brať najmä na všetky možné zdroje rušenia, či falošných udalostí ako napríklad pohyb a vzájomné trenie meraných telies a konštrukcií, poveternostné podmienky (napríklad spojitý šum dažďa, vzájomné posuvy a trenie častí konštrukcie pri vetre), alebo napríklad turbulencie prúdenia kvapaliny v sledovanom potrubí. V praxi často nie je možné s určitosťou rozoznať falošné indikácie zdrojov od skutočných. Pravdepodobnosť správnosti vyvedeného záveru sa dá posúdiť na základe signifikantnosti nameraných udalostí. Pravdepodobnosť zámenny s rušivým zdrojom sa dá znížiť aj ďalším monitorovaním nálezov, poprípade viacerými meraniami napr. so zmenou vonkajších podmienok skúšky. [1]

---

### 1.2.9 Vlastnosti metódy akustickej emisie

Metóda akustickej emisie je ako ostatné NDT metódy zvažovaná pre aplikácie na základe jej vlastností, výhod a nevýhod. Tieto vlastnosti ju odlišujú od klasických metód nedeštruktívneho testovania materiálov najmä s ohľadom na fakt, že je to metóda monitorovania aktivity vád, nie detekcie ich geometrie:

- Metóda deteguje procesy rozvoja a vplyvu výhradne aktívnych zdrojov.
- Pre aktivitu zdrojov musia byť splnené podmienky pre rozvoj ich procesov (stimulovanie) tj. meranie musí byť vykonávané pri prevádzkovom zaťažení, alebo skúšobnom zaťažení na vyššie ako prevádzkové hodnoty (tlaková skúška).
- AE je integrálna metóda – vyhodnocuje sa monitorovanie celých konštrukcií, alebo ich častí početnou sieťou snímačov.

Uvedené vlastnosti sa nedajú klasifikovať ako výhody alebo nevýhody, pretože to závisí iba od vhodnosti pre konkrétnu aplikáciu. Napríklad detekcia výhradne aktívnych zdrojov môže byť výhodou z pohľadu nálezov len skutočne nebezpečných vád, ktoré sa rozvíjajú, avšak pre početné aplikácie, kedy sú ako neprípustné klasifikované akékoľvek relevantné nálezy necelistvostí je daný prístup nepoužiteľný. Iné vlastnosti sa dajú globálne považovať za priaznivé, alebo obmedzujúce :

#### Výhody metódy AE

- Metóda môže byť zaradená medzi objemové (detekcia zdrojov na povrchu aj v objeme materiálu).
- AE môže byť použitá na monitorovanie iba z vonkajších povrchov tam, kde je sprístupnenie ostatných povrchov problematické, alebo úplne nemožné.
- V tichej prevádzke môže byť dosiahnutá vysoká citlivosť na sledované procesy.

- Metóda je veľmi flexibilná – môže byť použitá na monitorovanie rôznorodých procesov v rôznych podmienkach a aplikáciách.

#### Obmedzenia

- Neopakovateľnosť merania – sledované procesy rozvoja defektov sú deje nevratné a neopakovateľné. Nie je tak možné viac krát zmerať tú istú udalosť AE.
- Citlivosť na rušenie – pre relevantné výsledky je potrebné, aby v merateľnom frekvenčnom rozsahu bolo pásmo, do ktorého sa rušivé vplyvy okolia neprenášajú v takej miere, aby od nich mohli byť udalosti AE odlišené. Častokrát je práve prevádzka nutná pre meranie AE zároveň zdrojom rušivých signálov, ktoré toto meranie znehodnocujú.

Metóda AE rovnako ako ostatné metódy NDT nie je univerzálna, pre niektoré aplikácie je vhodná a v iných je prakticky nepoužiteľná. Jej použitie by malo byť zvažované častejšie najmä pre jej flexibilitu a rôznorodosť možných aplikácií. [1]

#### 1.2.10 Aplikácie metódy AE

1.2.10

---

Rôznorodé aplikácie metódy AE sa líšia stupňom poznania vyvođeného z merania, odvetviami priemyslu, a rôznymi procesmi, ktoré sú sledované. Meranie metódou AE môže byť použité na objasnenie prítomnosti defektov, alebo sledovaných javov, alebo môže poskytnúť komplexnejšie informácie o rozvoji procesov (nárast, pokles aktivity). Pre náročnejšie aplikácie je nutné použiť pokročilé systémy s digitalizáciou signálu, ktorý je ďalej zložito matematicky vyhodnocovaný. Interpretácia výsledkov takýchto meraní vyžaduje veľmi rozsiahle znalosti a skúsenosti.

Aplikácie meraní akustickej emisie sa dajú rozdeliť do troch kategórií: prevádzkové kontroly súčiastok konštrukcií a zariadení, sledovanie technologických procesov a merania v oblasti výskumu a vývoja.

Do prvej kategórie sa dajú zaradiť aplikácie, ktorých cieľom je detekovať vznik a vývoj defektov v konštrukciách pri prevádzkových zaťaženiach, či pri ich pevnostných skúškach. To platí aj pre tlakové nádoby – monitoring prevádzky aj tlakových skúšok. Ďalším takýmto typom aplikácie je sledovanie únikov média z tlakových systémov cez defekty, tvarové a regulačné prvky potrubí (ventily prírubové spoje...), alebo úniky zo zásobníkov. Metóda je využívaná aj pre sledovanie posuvov v stavebníctve, porušovanie betónových prvkov či hornín a podloží.

Pri sledovaní technologických procesov je metóda využívaná na sledovanie chladnutia odliatkov a zvarov, monitoring obrábania. V elektronike a elektrotechnike sú sledované napríklad výboje v transformátoroch či vznik defektov pri pájkovaní.

Do poslednej kategórie tvoriacej oblasť výskumu patria aplikácie monitorovania mechanických skúšok materiálu – sledovanie plastickej deformácie, šírenia trhlín a podobne.

Častou aplikáciou akustickej emisie je sledovanie kontaktnej únavy valivých ložísk. Výhodou tejto metódy je, že je využiteľná pre rôzne materiály, typicky sú to kovy, kompozity a betón ale aj drevo. [1]

### 1.3 Snímače akustickej emisie

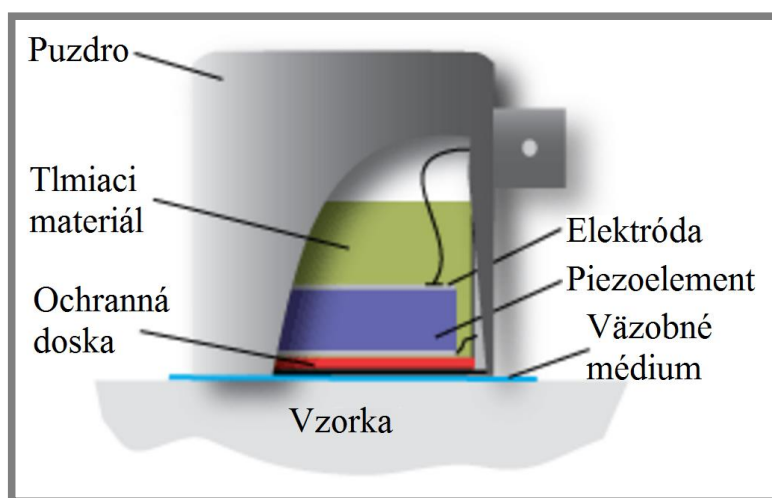
Najdôležitejším elementom v meracej a vyhodnocovacej zostave AE je snímač. Jeho významnosť spočíva v skutočnosti, že čokoľvek čo snímač nezachytí nie je možné nahradiť akoukoľvek úpravou signálu. Ich charakteristiky ovplyvňujú signál vo významnej miere, preto je voľba vhodného snímača kritická pre relevantnosť merania. Vo všeobecnosti majú snímače za úlohu meniť mechanickú výchylku povrchu na priebeh signálneho napätia, preto bývajú označované aj ako meniče. Základnými parametrami snímačov sú: citlivosť, prenosová charakteristika, frekvenčné pásmo, konštrukčné parametre (snímacia plocha, fyzické rozmery, použiteľnosť za zvýšených teplôt, mechanická odolnosť...) a v neposlednom rade ich cena. Citlivosť sa dá definovať tým, ako malú výchylku povrchu sú schopné transformovať na dostatočne veľké napätie. Teoreticky ideálny snímač dokáže vytvoriť krivku priebehu napätia v čase identickú so snímanou krivkou výchylky v čase. Existujú rôzne typy snímačov používaných na detekciu akustickej emisie, ktoré sa líšia fyzikálnymi princípmi, na ktorých je založená ich činnosť a tým aj ich charakteristikami. [1,18,22]

#### 1.3.1 Piezoelektrické snímače

Jedná sa o najbežnejší typ snímača používaný v NDT. Obsahuje piezokeramický element, ktorý pri jeho deformácii segreguje zodpovedajúci náboj a vytvára tak napätie medzi elektródami. Tento princíp je založený na piezoelektrickom jave, ktorý je definovaný tak, že pri mechanickom napätí sa elastickou deformáciou voči sebe posúvajú nosiče náboja (domény v ktorých je rovnaká elektrická polarizácia) z rovnovážnej polohy a tým sa okolo nich vytvára elektrické pole. Deformácia je elastickou odozvou na napäťovú vlnu šíriacej sa akustickej emisie na povrchu prenesenú na piezoelektrický kryštál. Piezoelement je pasívny prvok – mení deformáciu na napätie bez potreby napájacej energie. [1,13,22]

#### Konštrukcia snímača

Funkčným jadrom každého piezoelektrického meniča je keramický element, ostatné časti zabezpečujú iba jeho ochranu a konektivitu. Na oboch čelných plochách elementu sa nachádzajú elektródy – jedna uzemnená a druhá pripojená na vývod



Obr. 1.3.1-1 Časti piezoelektrického snímača [18]

signálu (konektor koaxiálneho vodiču). Ochranná doska slúži ako ochranný plát materiálu pre element pri väzbe snímača na materiál. Priestor v puzdre meniča je vyplnený tlmiacim materiálom často na báze epoxidu s obsahom tvrdých volfrámových častíc, ktorý má za úlohu tlmiť vlny akustickej emisie tak, aby sa opakovane neodrážali medzi snímacím elementom a puzdrom. Do istej miery slúži tiež na zatlmenie vlastnej rezonancie elementu pre dosiahnutie odozvy snímača širšom frekvenčnom pásme. Puzdro snímača býva väčšinou s vodivého materiálu aby okrem funkcie kompaktného mechanického obalu zabezpečovalo aj elektromagnetické tienenie. Táto základná konštrukčná schéma je využívaná aj v rôznych modifikáciách napríklad do prostredia so zvýšenou teplotou, so vstavaným predzosilňovačom či pri snímačoch s viacerými snímacími elementmi. [22]

#### Frekvenčné pásmo

Snímanie akustickej emisie je založené hlavne na frekvenčnom pásme približne 30 kHz až 1 MHz. Nižšie frekvencie sú v značnej miere nositeľom rušivých signálov a vyššie príliš podliehajú útlmu ich amplitúdy od vzdialenosti, ktorú musia od zdroja ku snímaču prekonať. V tomto pásme záujmu sa pohybujú aj frekvenčné charakteristiky piezoelektrických snímačov. Tie môžu byť navrhnuté ako širokopásmové (pokrývajúce celé toto spektrum), ktoré bývajú špeciálne použité pri laboratórnych experimentoch, pre kalibráciu a všeobecne tam, kde je potrebné veľmi presné stanovovanie výchylky povrchu v čase. Ostatné typy snímačov pokrývajú obyčajne časť tohto pásma – ich frekvenčná charakteristika je dosiahnutá vhodnou voľbou tvaru a fyzických rozmerov piezoelektrického elementu (hrúbka a priemer).

#### Vplyv zvýšenej teploty

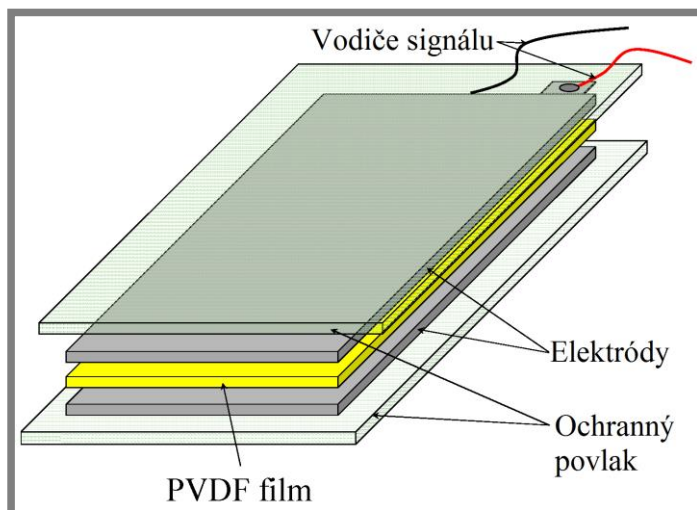
Každý typ keramického materiálu používaný pre výrobu piezoelektrických snímačov má svoju špecifickú teplotu, pri ktorej stráca schopnosť vykazovať piezoelektrický jav. Táto teplota sa nazýva Curieho a dochádza pri nej k prechodu materiálu z feromagnetickkej do paramagnetickej fázy. PZT keramiky (tuhé roztoky olova, zirkónu a titánu) majú túto teplotu v rozmedzí 300 až 400°C, bário-titánová keramika okolo 120°C a lítium-niobová keramika až 1210°C. Použitie konkrétneho materiálu piezoelektrického snímača je limitované touto teplotou (statická teplota povrchu aplikácie). Pri aplikácii piezoelementu je dôležitá aj premenlivosť teploty. Zmena teploty spôsobuje, že niektoré domény menia svoju polaritu – čím väčšia zmena teploty, tým väčší počet, to sa napríklad pri zmene o 100°C prejaví v makroskopickej mierke výraznou zmenou vlastností snímača. Vzhľadom na túto vlastnosť je potrebné aj pri statickej teplote okolia vždy pred snímaním dať počkať, kým sa snímač ustáli na pracovnej teplote prostredia. [22]

### 1.3.2 Piezofilmové snímače

V piezofilmových snímačoch sa ako piezoelektrický element používa fólia polykrystalických polymérnych materiálov (napríklad PVDF – Polyvinylidénfluorid) hrubá obvykle desiatky mikrometrov. Tieto materiály vykazujú piezoelektrický jav vďaka vnútorným dipólom, ktoré sú tvorené väzbou medzi atómami uhlíku a fluóru. [23,24]

1.3.2

---



Obr. 1.3.2-1 Konštrukcia piezofilmového snímača [25]

Oproti keramickým piezoelementom majú výhody v tom, že sa dajú ľahko spracovať do rôznych tvarov, nie sú krehké - náchylné na zničenie a sú ľahké a flexibilné takže neovplyvňujú pohyb povrchu, ktorý snímajú. Najväčšou výhodou je však vyššia citlivosť a široké frekvenčné pásmo tohto typu snímačov. Zásadným obmedzením využiteľnosti tohto typu snímačov je ich silná závislosť od teploty a ich citlivosť na elektromagnetické rušenie. [23,24]

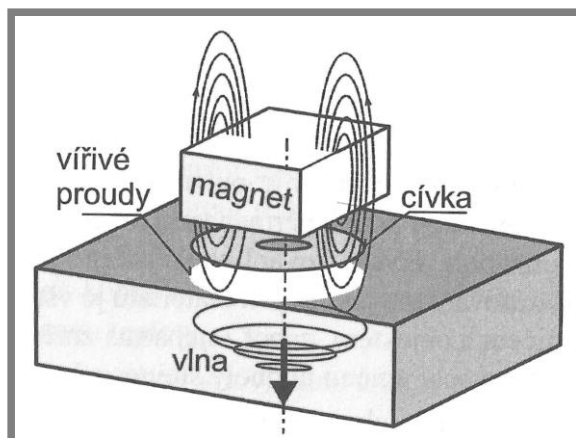
### 1.3.3 Kapacitné snímače

Princíp činnosti kapacitných snímačov je založený na zmene elektrickej kapacity paralelného doskového kondenzátoru v závislosti na vzájomnej vzdialenosti dosiek. Pokiaľ je teda jedna doska nehybne uchytená a druhá vibruje spolu s povrchom, tak je na základe zmeny kapacity medzi doskami možné elektrickým signálom veľmi presne kopírovať výchylku povrchu spôsobenú napríklad akustickou emisiou. Presnosť snímania výchylky je často využívaná v špeciálnych laboratórnych aplikáciách akustickej emisie, avšak pre bežné použitie má tento snímač nedostačujúcu citlivosť. Výhodou je nižšia cena ako pri piezoelektrických snímačoch, takže sú využívané napríklad na trvalú montáž na konštrukcii pri potrebe sledovať veľké aktivity zdrojov. [22,26,27,28]

### 1.3.4 Elektromagneto-akustické snímače

Elektromagneto-akustické meniče (Electromagnet acoustic transducers – EMAT) sa skladajú z permanentného magnetu a cievky. Snímač je priblížený k snímanému povrchu a kmitanie častíc v magnetickom poli snímača vyvoláva striedavý prúd v materiáli, ktorý je snímaný cievkou. Rovnaký princíp je využívaný v ultrazvukových budičoch, kedy sú kmity sondou vyvolávané aj snímané. Pri použití na feromagnetické materiály sú takto budené kmity vyvolávané Lorentzovou silou a magnetostrikčným javom, pri neferomagnetických materiáloch je to iba Lorentzova sila. Tento spôsob detekcie patrí medzi bezkontaktné metódy snímania. [28,29]





Obr. 1.3.4-1 Princíp činnosti EMAT snímačov [5]

### 1.3.5 Laserová interferometria

Laserový interferometer patrí medzi optické snímače. Metóda snímání povrchu je založená na nasmerovaní hélum-neónového laserového lúču na sledovaný povrch a snímání jeho odrazu interferometrom. To znamená, že pre dosiahnutie požadovanej presnosti je potrebný zrkadlový lesk povrchu súčiastky. Meranie touto metódou môže detekovať rýchlosť zmeny výchylky povrchu do  $0,3\mu\text{m/s}$ . Výhodou je presnosť (výstup v podobe signálu zodpovedajúceho výchylke povrchu, jednoduchá a presná kalibrácia a reprodukovateľnosť) a možnosť merania za zvýšených teplôt (bezkontaktné snímání). Nevýhodou je nízka citlivosť pri širšom frekvenčnom pásme, vysoká cena a požiadavky na veľmi vysokú kvalitu povrchu. Tieto vlastnosti predurčujú laserovú interferometriu pri snímání akustickej emisie na laboratórne merania. [22,28]

1.3.5

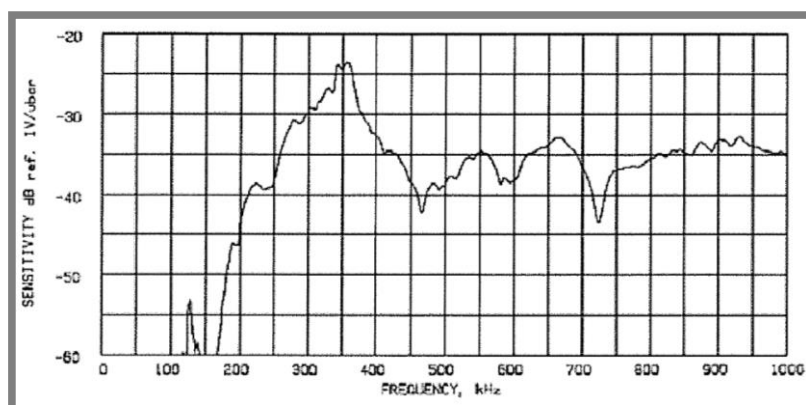
### 1.3.6 Kalibrácia snímačov

Kalibrácia snímačov slúži na určenie ich parametrov a charakteristík. Vo všeobecnosti platí, že pri kalibrácii sa určuje odozva snímača v podobe signálu napätia na definované mechanické budenie. Rozlišujeme dva základné typy kalibrácie, ktoré sa líšia najmä definíciou budiaceho pulzu :

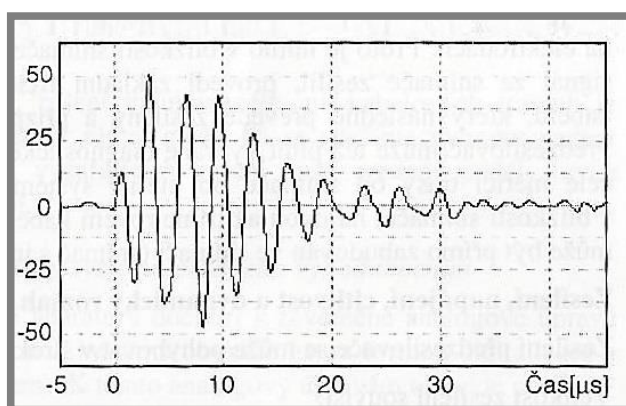
1.3.6

#### Absolútna kalibrácia

Pri absolútnej kalibrácii je sledovaná napäťová odozva signálu na delta pulz, ktorého presný priebeh poznáme. Tento pulz môže byť definovaný ako priebeh výchylky v metroch alebo priebehom akustického tlaku v pascaloch. Celková odozva tvorí prenosovú funkciu snímača, ktorá predstavuje základný popis jeho správania. Výstupom kalibrácie je taktiež frekvenčná charakteristika (obr. 1.3.6-1) a časová odozva na delta pulz (obr. 1.3.6-2). [1,13,28]



Obr. 1.3.6-1 Frekvenčná charakteristika snímača [13]



Obr. 1.3.6-2 Odozva snímača na kalibračný  $\delta$  pulz [1]

#### Relatívna kalibrácia

Tento spôsob kalibrácie je založený na sledovaní odozvy snímača na jeden nemenný kalibračný zdroj napríklad pentest. Pri použití tohto typu zdroja nie je známy presný priebeh výchylky budenia, ale pri opakovaní zostáva približne rovnaký. To umožňuje kalibráciu siete nainštalovaných snímačov priamo na mieste merania tak, že sa porovnáva maximálna hodnota amplitúdy pri buzení rovnakým zdrojom (citlivosť). Výhodou tejto kalibrácie je práve fakt, že pokiaľ je vykonaná priamo pred samotným meraním, zahŕňa vplyvy danej aplikácie (napríklad kontakt konkrétneho snímača s konkrétnou časťou povrchu...). Druhou možnosťou je záznam celkovej odozvy snímača na jednotné budenie. [1,13,28]

### 1.4 Montáž snímačov AE

Pre dosiahnutie relevantných výsledkov merania je potrebný spoľahlivý kontakt medzi snímačom a sledovaným povrchom dosiahnutý akustickou väzbou. Akustická väzba je rozhranie medzi snímačom a povrchom, kde dochádza k prenosu akustickej energie. Väčšinou je tvorená akustickým médiom (napr. vazelínou) pre vyplnenie vzduchových medzier medzi povrchmi rozhrania. Spôsoby inštalácie snímačov na súčiastku či konštrukciu sa dajú rozdeliť podľa kontaktu snímača s povrchom na priame a nepriame.



#### 1.4.1 Priama inštalácia snímača na povrch

1.4.1

---

Priama inštalácia snímača na povrch znamená jeho pritlačenie priamo na povrch s použitím väzobného média, alebo bez neho. Senzor môže byť prichytený pomocou upínacieho prípravku, prilepený alebo privarený k povrchu. [1]

#### 1.4.2 Nepriama inštalácia snímača na povrch

1.4.2

---

Pri aplikáciách, kde je snímaný povrch fyzicky neprístupný, alebo podmienky prostredia (teplota, radiácia, chemické prostredie...) neumožňujú priamu montáž senzoru sa využíva nepriama inštalácia cez akustické vlnovody. Vlnovod je tenká tyč obvykle kruhového prierezu, ktorá je na jednom konci kónicky (niekedy aj osadením, alebo exponenciálnym zvýšením polomeru, ktoré zabezpečuje najmenšie skreslenie vlnenia, ale je náročné na výrobu) rozšírená do čela, ktoré je určené na väzbu so snímačom. Úzky koniec je cez akustickú väzbu spojený s povrchom a prenáša tak jeho výchylku na snímač, ktorý je vďaka tomuto prvku v bezpečnej vzdialenosti od nepriaznivého prostredia napríklad so zvýšenou, alebo kolísajúcou teplotou. [1,30]

##### Montáž vlnovodu

Pri tomto spôsobe inštalácie sú dve akustické rozhrania: medzi vlnovodom a snímaným povrchom, medzi vlnovodom a snímačom. Prvé rozhranie je otázkou montáže vlnovodu. Najvýhodnejšie je privarenie úzkeho konca priamo na povrch, prípadne jeho narazenie alebo tesné naskrutkovanie do montážneho otvoru v povrchu. Tieto spôsoby však nie sú vždy možné, pretože vyžadujú značný zásah do povrchu – v týchto situáciách musí byť koniec vlnovodu iba pritlačený na povrch. Tu ale vystáva problematika použitia väzobného média a upínacieho prípravku v nepriaznivom prostredí. Materiál vlnovodu by mal mať zhodné vlastnosti šírenia akustických vln ako materiál sledovaného objektu, aby nedochádzalo k odrazom na ich rozhraní. Vlnovody sa dajú na základe rozhrania so snímačom rozdeliť na rozoberateľné a nerozoberateľné. Pri rozoberateľných je vlnovod samostatný prvok, na ktorý je snímač dodatočne namontovaný. Do druhej kategórie patria snímače s integrovaným vlnovodom. [22,30,31]

##### Vplyv vlnovodu na výsledný signál

Pri inštalácii snímača cez vlnovod je značne znížená citlivosť snímania. Celkový pokles býva v závislosti od použitej snímačovej zostavy a aplikácie o 10 až 20 dB. Je to zapríčinené prechodom vlnenia cez dve rozhrania, útlmom, ale aj tlmením okolitého prostredia. Okolité prostredie má zásadný vplyv na útlm najmä pri látkach s vysokou akustickou impedanciou - kvapalinách (napríklad pri meraní na povrchu, ktorý je ponorený pod vodou). Ďalším javom je ustálenejší signál pri použití vlnovodu vplyvom jeho dĺžky a proporcií. [30,31]

#### 1.4.3 Akustická väzba a kontakt snímača s povrchom

1.4.3

---

Pri montáži snímača akustickej emisie na povrch je použité väzobné médium na vyplnenie vzduchových medzier medzi nerovnosťami čela snímača a povrchom. Keramický materiál piezoelementu a snímaná oceľ majú pomerne vysokú akustickú impedanciu, takže sú schopné dobre prenášať vlnenie. Vzduch má impedanciu mnohonásobne nižšiu, tvorí tak nechcené rozhranie, ktoré musí vlnenie prekonať. Bez použitia väzobného média by bolo vlnenie na menič prenášané iba niekoľkými

najvyššími bodmi plôch v kontakte a tým by bola prenesená iba malá časť energie snímaného vlnenia a dosiahnutá nedostatočná citlivosť. Počet stykových bodov (tvoriacich reálnu stykovú plochu) sa dá zvýšiť vysokou prítlačnou silou snímača na povrch, ktorá spôsobí deformáciu drsností povrchov, ale tento spôsob je využívaný iba tam, kde prostredie aplikácie alebo vysoké požiadavky na čistotu neumožňujú použitie väzobného média v akejkoľvek forme. Prítlačná sila na snímač by sa mala pohybovať v takom rozmedzí, aby boli stykové plochy stláčané tlakom orientačne okolo 0,7 MPa. Najlepšie výsledky sú dosahované pri použití média a malej prítlačnej sily, ktorá zabezpečuje čo najtenšiu vrstvu média tak, aby naozaj iba vyplňala medzery medzi profilmi drsnosti stykových povrchov. Zasadou je aj usilovať sa, aby bola vrstva čo najrovnomernejšia. Vždy platí, že akustická väzba je lepšia pri vyššej kvalite stavu snímaného povrchu (malá drsnosť povrchu, rovinnosť). Nepriaznivý vplyv na citlivosť majú povrchové nátery, korózia či nečistoty. [22,32]

Pre aplikácie snímania akustickej emisie je použiteľná široká rada kvapalín plniacich funkciu akustického väzobného média. Aj bežné kvapaliny s rôznou viskozitou (olej voda, glycerín, plastické mazivo) zabezpečia dostačujúcu väzbu s výstupnou amplitúdou signálu až 30x väčšou ako bez ich použitia. Avšak ešte lepšie výsledky sú dosahované použitím špeciálnych ultrazvukových gélov, tekutín či vazelín. Vo všeobecnosti musí mať použité médium čo najvyššiu akustickú impedanciu, najnižší útlm, musí potláčať vznik vzduchových bublín a mať dobrú zmáčavosť povrchu (malý kontaktný uhol). Pri voľbe média pre konkrétnu aplikáciu je potrebné zvážiť aj jeho použiteľnosť za danej teploty povrchu, prípadné chemické vplyvy a životnosť pri dlhodobých monitorovaniach. [22,32]

Ďalším spôsobom vytvorenia spoľahlivej akustickej väzby je prilepenie senzoru k povrchu, plniace aj úlohu montáže. Pokiaľ je potrebné snímať aj tangenciálne zložky vlnenia, je kľúčová vysoká viskozita použitého prípravku. V takomto prípade je prilepenie vhodnejší spôsob väzby k povrchu. Používajú sa napríklad epoxidové živice. Tento spôsob uchytenia a väzby je nevhodný pre montáž na povrchy, na ktorých dochádza k dilatáciám vplyvom namáhania, alebo zmien teploty, pretože by mohlo dôjsť k prasknutiu spoja a úplnej strate väzby. Podobným spôsobom môže byť privarenie snímača na konštrukciu tam, kde to podmienky umožňujú (väčšinou pri trvalom pripevnení snímača pre dlhodobé monitorovanie. [22,32]

#### 1.4.4 Prípravky pre uchytyvanie snímačov k povrchu

Pokiaľ snímač nie je k povrchu prilepený, alebo privarený, musí byť uchytený v prípravku, ktorý zabezpečuje jeho montáž k povrchu. Požadované vlastnosti držiakov na snímače :

- Schopnosť pevne prichytiť snímač k povrchu – musí byť zabezpečený dostatočne pevný styk prípravku so snímaným objektom a zároveň dostatočná prítlačná sila na snímač pre spoľahlivú akustickú väzbu.
- Pre opakovateľnosť merania by prípravok mal zabezpečovať konštantnú prítlačnú silu, prípadne silu nastaviteľnú tak, aby sa pri opakovanom upínaní dali vytvoriť rovnaké podmienky snímania.
- Upínače nesmú byť zdrojom akustickej emisie ani obsahovať žiadne voľné časti, ktoré by mohli skresliť výsledný signál merania, ani nesmie znateľne

tlmiť snímané vlnenie. Celkovo by mali byť navrhnuté tak, aby čo najmenej ovplyvňovali charakteristiky snímača.

- Pri dlhodobých upnutiach snímačov musí byť zabezpečené, aby sa nezmenili podmienky upnutia (zamedzenie pohybu snímača, konštantnosť prítlačnej sily...) v dôsledku zmien podmienok prostredia aplikácie.
- Prípravok by mal zahŕňať pridržiavač káblu (prípadne aj predzosilňovača), ktorý zabezpečí aby voľný kábel neťahal za snímač. Ak toto upínač nespĺňa, treba kábel zaistiť iným spôsobom s ohľadom na fakt, že poklepnutie káblu o povrch je falošný zdroj akustickej emisie.
- Pri montáži snímača sa musí dbať na to, aby bolo jeho puzdro elektricky odizolované od povrchu. Pokiaľ je teda upínací prípravok z vodivého materiálu, kontaktné miesta by mali byť oddelené napríklad izolačnou páskou.
- Upínacie prípravky musia byť navrhnuté tak, aby pri ich použití nebol akýmkoľvek spôsobom poškodený snímaný povrch viac, ako je pri danej aplikácii prípustné.
- Upínače by mali byť opakovateľne použiteľné, prípadne pri dlhodobých aplikáciách by mali mať predpokladanú životnosť dostávajúcu tak, aby nebola potrebná jeho údržba počas prevádzky. [33]

V súčasnosti sú používané rôzne upínacie prípravky líšiace sa ako spôsobom ich upevnenia k testovanému telesu, tak v spôsobe uchytenia snímačov a vytvorenia prítlačnej sily. Všeobecný princíp je, že sila držiaca prípravok na povrchu musí byť väčšia ako sila pôsobiaca prípravkom na snímač.

Najčastejšie používaný princíp uchytenia snímačov je pomocou prípravkov, ktoré na povrchu držia vďaka permanentným magnetom. Niektoré typy snímačov majú magnetické puzdro, alebo je priamo ich dotyková plocha tvorená silným permanentným magnetom, takže k ich montáži nie sú potrebné ďalšie prípravky.

Výhodou tejto metódy je jednoduchosť a spoľahlivosť tohto riešenia. Nevýhodou je použiteľnosť obmedzená na feromagnetické materiály (sú nepoužiteľné pri testovaní napríklad nekovových materiálov, väčšiny neželezných kovov a austenitických ocelí) a obtiažna demontáž z povrchu pri použití silných magnetov. Aby sa dali prípravky jednoduchšie odtiahnuť od telesa, bývajú často ich konštrukčnou súčasťou rukoväte pre lepšiu manipuláciu.



Obr. 1.4.4-1 Magnetický upínač [35]

Ďalšou z možností pripevnenia montážneho prípravku k povrchu je pomocou elastických popruhov. Pre ich použitie je potrebné obopnúť skúšobné teleso, takže sú použiteľné pri potrubíach, či nosníkových konštrukciách, nedajú sa však použiť na montáž k rozsiahlym povrchom. Pre tento účel sa dajú využiť aj jednoduché podtlakové prísavky, ktoré sa dajú pripevniť iba k hladkým povrchom. Prípravky môžu byť k povrchu prilepené, či privarené (zváranie je používané hlavne pri dlhodobých aplikáciách) tam, kde je nežiadúce takto upevniť priamo snímač, aby ho v prípade potreby bolo možné vymeniť. Pre jednoduché pripevnenie snímača na povrch sa občas používa lepiaca páska, tá však nezaručuje opakovateľnú prítlačnú silu. [34]

Iný použiteľný spôsob montáže je upnutie prípravku o povrch pomocou skrutiek, ktoré sú uchytané priamo do povrchu, alebo do protikusu obopínajúce skúšobné teleso. Tento princíp sa využíva aj k montáži snímača na vlnovod, kedy sú k sebe snímač a vlnovod stláčané pomocou dvoch prírub sťahovaných skrutkami. Snímač je možné namontovať aj na ploché dno otvoru so závitom, pri tomto spôsobe je však obmedzená detekcia povrchových vln. [33]



Obr. 1.4.4-2 Upínač využívajúci ťažné pružiny [36]

Prítlačná sila môže byť vytvorená pomocou tlačnej alebo ťažnej pružiny, utiahnutím skrutky tlačiacej snímač k povrchu, alebo stlačením elastickej hmoty (napríklad peny – obrázok 1.4.4-2). Výhodná je konfigurácia s pružinou, ktorej predpätie sa dá nastaviť skrutkou a tak sa dá nastaviť prítlačná sila na snímač (obrázok 1.4.4-1).



Obr. 1.4.4-3 Magnetický upínač využívajúci elasticú penu [37]

Bez ohľadu na konkrétny spôsob montáže a akustickej väzby je vždy potrebné vykonať relatívnu kalibráciu pred samotným meraním pre kontrolu kontaktu s povrchom a nastavenie potrebných parametrov systému. Najmä pri časovo rozsiahlejších meraniach je dobré kalibráciou stav overiť aj počas merania prípadne aj na konci pre overenie relevantnosti nameraných dát. [1]

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

---

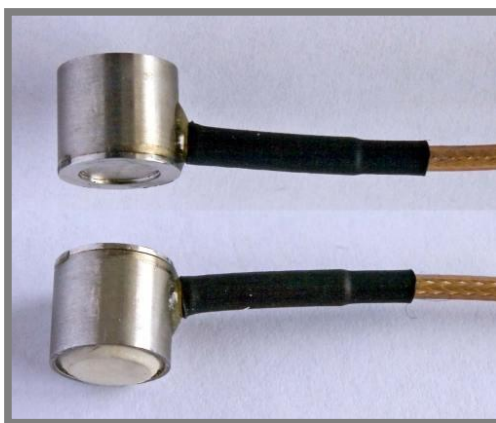
Existuje množstvo rozmanitých spôsobov ako upevniť snímač k povrchu sledovaného objektu počas meranie metódou akustickej emisie. Každý spôsob má svoje výhody a nedostatky, niekedy je postačujúce jednoduché riešenie a inokedy je potrebné použiť sofistikované prípravky a postupy. Všetko závisí od podmienok a požiadaviek konkrétnej aplikácie metódy, preto je potrebné zvážiť všetky relevantné možnosti s ohľadom na parametre špecifického merania.

Cieľom tejto práce je navrhnúť montážne riešenie pre konkrétne požiadavky použitia v energetickom priemysle :

- Meranie za teploty okolo 20°C
- Montáž na valcový prípadne guľovitý povrch o priemere 300 – 500 mm
- Materiál telesa je zliatina hliníku, takže je neferomagnetický
- Povrch telesa je ošetrený povrchovým náterom a nepripúšťa sa nijaké poškodenie či zásah
- Povrch je prístupný iba z vonkajšej strany
- Jedná sa o výstupnú kontrolu zariadení, takže je potrebná jednoduchá a rýchla montáž a demontáž
- Hlavným cieľom merania je lokalizácia, prípadne posúdenie rozsahu aktivity zdrojov akustickej emisie

Objekty merania majú charakter potrubných segmentov, kolien spájaných prírubami. Dĺžka zostáv, na ktorých je vykonávané meranie je 10 – 11 m, je potrebné vytvoriť jednorozmernú sieť snímačov s rovnomernými rozstupmi pre lokalizáciu zdrojov.

Snímače použité pri tejto aplikácii sú od českej firmy Dakel typu IDK-09, ktoré majú priemer kovového puzdra 9 mm vysoké sú rovnako 9 mm. Majú radiálny vývod zabudovaného koaxiálneho káblu a korundovú dotykovú plochu o priemere 6 mm. [38]



Obr. 2-1 Použitý snímač od firmy Dakel [38]

Tento snímač nemá integrovaný predzosilňovač, takže je potrebné použiť samostatný predzosilňovač a zaradiť ho priamo za snímač.



**Obr. 2-2** Skúšobný segment potrubia

Pre možnosť overenia funkčnosti navrhovaných systémov upínania je použitý segment potrubia (obr. 2-2). Osvedčené prípravky budú ďalej testované pri konkrétnych meraniach u zákazníka.



### 3 KONCEPČNÉ RIEŠENIE

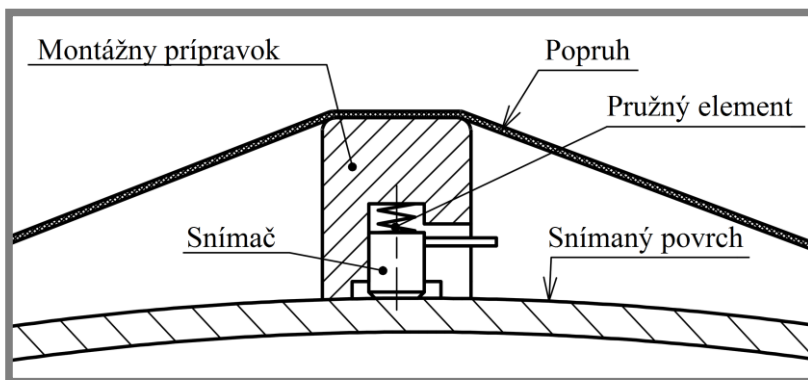
Väčšina komerčne dostupných montážnych prípravkov sú magnetické upínače nevhodné pre tento typ aplikácie. Jednoduché prilepenie snímača na povrch je vyradené požiadavkou na rýchlu, často opakovanú montáž a demontáž. Metóda nalepenia je nevhodná aj pre to, že by mohlo dôjsť k poškodeniu povrchu – najmä povrchového náteru. Na povrchu nie sú žiadne otvory alebo závit a nepripúšťa sa nijaký zásah či poškodenie, takže montáž pomocou skrutiek a podobne taktiež nepripadá do úvahy. Aplikácia je za bežných teplôt, preto bude snímač namontovaný priamo na povrch.

Využitelné princípy sú montáž pomocou prísaviek zabezpečujúcich pripevnenie prípravku k povrchu (povrch je čistý, hladký a vzhľadom na potrebnú plochu prísavky málo zakrivený), pomocou popruhov (teleso sa dá jednoducho obopnúť). Podobný princíp ako elastický popruh je montáž pomocou pružných oceľových strmeňov.

#### 3.1 Montáž pomocou elastických popruhov

Jednou z prvých ideí ako vyriešiť montáž pri danej aplikácii bola využiť pružné popruhy, ktoré by obopínali skúšobné teleso, pod ktorými by bol umiestnený jednoduchý prípravok na držanie snímača. Možnosti ako využiť tento princíp sú :

Popruh pritláčajúci k povrchu prípravok, ktorý využíva elastickú penu prípadne pružinu na pritlačenie snímača k povrchu (obr 3.1-1). Tento spôsob je založený na klasickom princípe separátneho uchytenia montážneho prípravku a vyvolenia pritlačnej sily. Výhodou tejto možnosti je, že popruh nemusí vyvolávať na prípravok definovanú silu, stačí ak by vyvolával silu väčšiu ako pritlačná sila na snímač. Definovanú silu by nezávisle od popruhu vyvolávala pružina, alebo elastická pena, ktorá by bola vždy rovnako stláčaná. Nevýhodou tejto metódy je, že je konštrukčne trochu zložitejšia ako ďalšia možnosť.

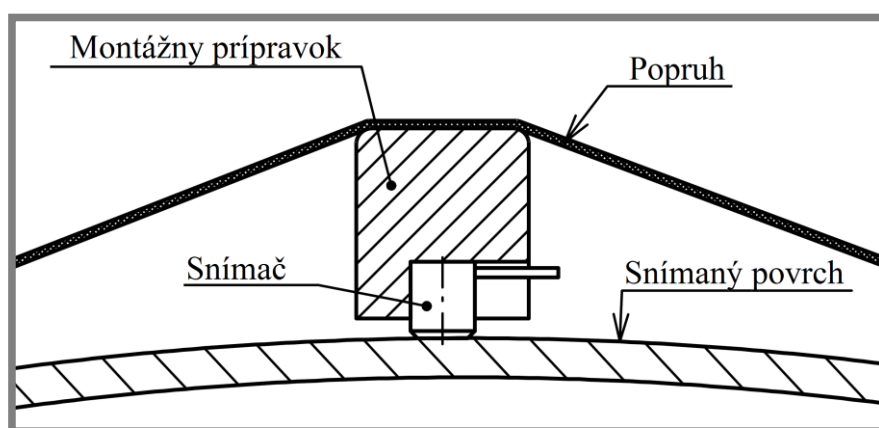


Obr. 3.1-1 Schéma konceptu montáže popruhom 1

Popruh slúžiaci priamo na pritlačenie snímača k povrchu cez prípravok držiaci senzor (obr 3.1-2) je ďalší možný prístup. Prípravok nie je v kontakte s povrchom, slúži iba na tvarové uchytenie snímača o popruh a centrovanie sily od popruhu na snímač. Predpoklad, že zostava s prípravkom sa povrchu dotýka iba na to určenou plochou snímača môže predstavovať nevýhodu – nestabilitu prípravku, ktorý sa

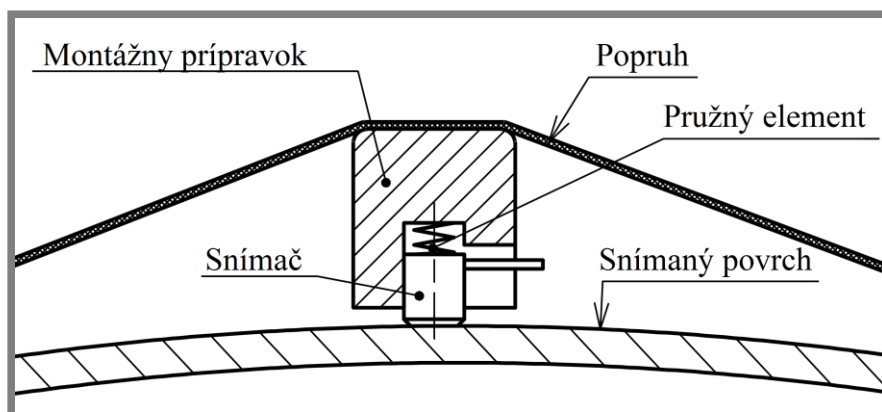


môže preklopiť na stranu. Prítlačná sila je daná napätím v popruhu, takže jeho voľnou dĺžkou voči dĺžke po napnutí. Dĺžka po napnutí závisí na priemere obopínanej časti konštrukcie, to poskytuje ďalšie dve možnosti – popruh nastaviteľný, alebo s pevnou dĺžkou. Nastaviteľnosť dĺžky je výhodná pre univerzálnosť – s dĺžkou je nastaviteľná prítlačná sila na snímač aj pri rôznych priemeroch. Pri pevnom popruhu bude sila jasne závislá na veľkosti obopínaného priemeru, ale tento nedostatok je jednoducho odstránený relatívnou kalibráciou pred meraním, ktorá musí byť vykonaná vždy. Pri použití siete snímačov budú pevné popruhy zaručovať jednotnú silu na všetkých snímačoch. Z hľadiska efektívnosti použitia môže byť nastaviteľnosť sily dĺžkou popruhu aj nevýhodou, pretože môže dochádzať k ich „rozladeniu“. Dĺžka popruhov by sa tak stala ďalším parametrom, ktorý treba kontrolovať a nastavovať pred skúškou zdržujúc celý proces.



Obr. 3.1-2 Schéma konceptu montáže popruhom 2

Ďalšia možnosť je kombináciou predošlých dvoch spôsobov spájajúca prítlačnú silu popruhu s prítlačnou silou elastickej peny (pružiny). Jedná sa o modifikovanú druhú variantu, kde pružný element v prípravku tlmí a rozkladá pôsobenie popruhu (obr. 3.1-3). Na druhú stranu pri použití tohto princípu nemôže byť snímač napevno uchytený v prípravku, čím sa zvyšuje nestabilita systému.

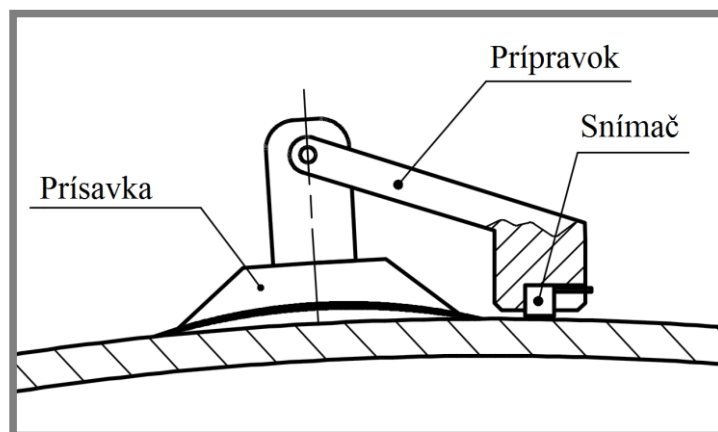


Obr. 3.1-3 Schéma konceptu montáže popruhom 3

Prípravky na montáž snímačov boli zhotovené pomocou 3D tlače z ABS plastu. Metóda Rapid Prototyping umožňuje rýchlu realizáciu navrhnutých variantov, ktoré môžu byť otestované a ďalej upravené.

### 3.2 Montáž pomocou prísaviek

Ďalšou možnosťou, ako vyriešiť upínanie snímačov na neferomagnetický povrch je použitie podtlakových prísaviek. Takéto prísavky sú v rôznych typoch a veľkostiach bežne dostupné, preto je potrebné vyriešiť konštrukciu prípravku, ktorý bude držať snímač a pritláčať ho k povrchu definovanou silou. Prípravok musí byť kompatibilný so zakúpenou prísavkou, ktorá ho bude držať na povrchu.



Obr. 3.2-1 Schéma konceptu montáže pomocou prísavky

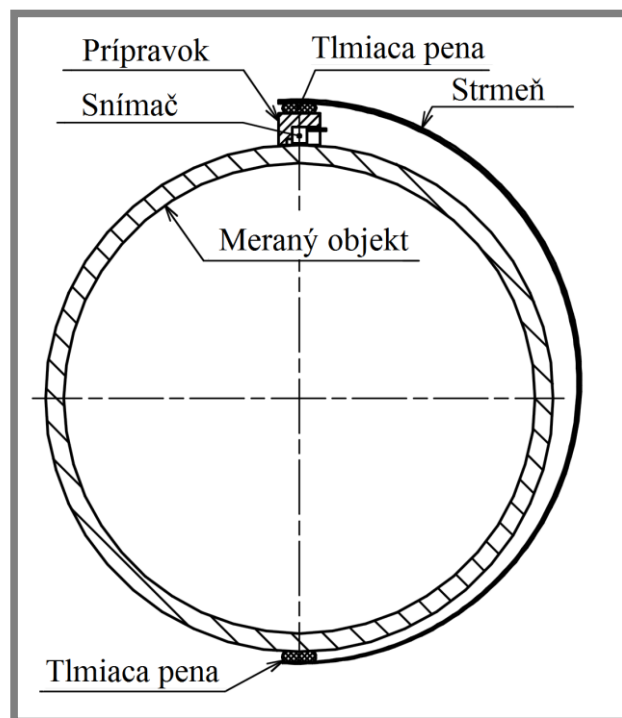
Princíp funkcie prípravku je obdobný ako v predchádzajúcom spôsobe montáže – snímač má kĺzať v jeho dutine pritláčaný proti povrchu silou stlačeného pružného elementu (elastickej peny, alebo malej pružiny).

Tento systém má oproti montáži popruhom výhodu v rýchlosti montáže – nie je potrebné obopínať potrubný segment, prísavka je jednoducho a rýchlo aplikovaná na povrch. Nevýhodou je neurčitá spoľahlivosť kontaktu s povrchom.

### 3.3 Montáž pomocou pružných strmeňov

Podobný princíp pritláčania držiaku na snímač o povrch ako pomocou popruhu je s použitím predpätého strmeňa. Myšlienka spočíva vo využití plochej polotovarovkej tyče z ocele zohnutej do tvaru „C“ (Obr 3.3-1). Pri snahe rozťahnuť jej konce od seba tyč pôsobí silou podobne ako ťažná pružina. Pokiaľ je teda takýto strmeň zohnutý do tvaru, ktorý obopína skúšobné teleso a vzdialenosť jeho voľných koncov je menšia ako priemer potrubia s výškou držiaku na snímač, môže byť využitý k pritláčaniu montážneho prvku so snímačom o povrch. Pre rovnomerné rozloženie sily na snímač môže byť na miesto úchyty snímača použitý kus mäkkej peny. Obdobnú tlmiacu vrstvu je vhodné použiť aj na druhom konci pri styku strmeňa s potrubím, aby nedošlo k poškodeniu povrchu od kontaktu, prípadne pre zabránenie sklĺznutiu strmeňa.

Výhodou tohto spôsobu upínania oproti ostatným je najmä jednoduchosť konštrukcie, ktorá nevyžaduje výrobu tvarovo zložitejších prípravkov. Jednalo by sa iba o zohnutie plochej tyče do vhodného tvaru a prípadnú aplikáciu povrchovej úpravy.



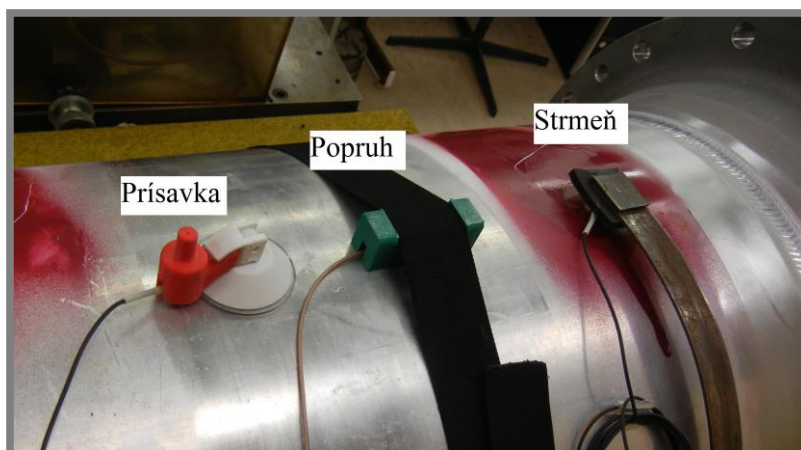
Obr. 3.3-1 Schéma konceptu montáže pomocou strmeňa

Tento variant má oproti predchádzajúcim radu nevýhod. Prvou je ťažko regulovateľná prítlačná sila daná konkrétnym tvarom strmeňa, ktorý by sa mohol pri opakovanom používaní meniť (prílišným roztiahnutím koncov pri snahe získať viac montážneho priestoru). Ďalšou nevýhodou je neobratnosť strmeňov – zložitejšia montáž, s tým súvisí aj riziko poškodenia povrchu. Tvar strmeňov je taktiež nepraktický na skladovanie a prepravu.

### 3.4 Zhrnutie

V predchádzajúcich kapitolách boli popísané možné prístupy k riešeniu otázky upínania snímača akustickej emisie na povrch za daných podmienok. Každý spôsob má svoje vlastnosti a obmedzenia, ktoré rozhodujú o vhodnosti jeho použitia. Pri prvotnom skúšaní prototypov jednotlivých metód sa ukázali ako použiteľné spôsoby uchytávania pomocou popruhu a prísavky.

3.4



Obr. 3.4-1 Porovnanie konceptov montáže

Oproti uchytávaniu pomocou prísavky sa popruh javí ako spoľahlivejší avšak o niečo zložitejší a zdĺhavejší na montáž.

Ako úplne nevhodná sa ukázala metóda pomocou pružných strmeňov, ktoré majú veľa nevýhod ako napríklad náročná montáž, nereprodukovateľná prítlačná sila a riziko poškodenia povrchu pri manipulácii. Kvôli týmto nevýhodám je použitie strmeňov v porovnaní s ďalšími možnosťami nepraktické a neprináša nijakú ďalšiu výhodu okrem principiálnej jednoduchosti.

Na základe posúdenia vlastností využiteľných princípov montáže snímačov boli zvolené možnosti s využitím popruhov a prísaviek, ktoré budú ďalej rozvíjané.

## 4 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

4

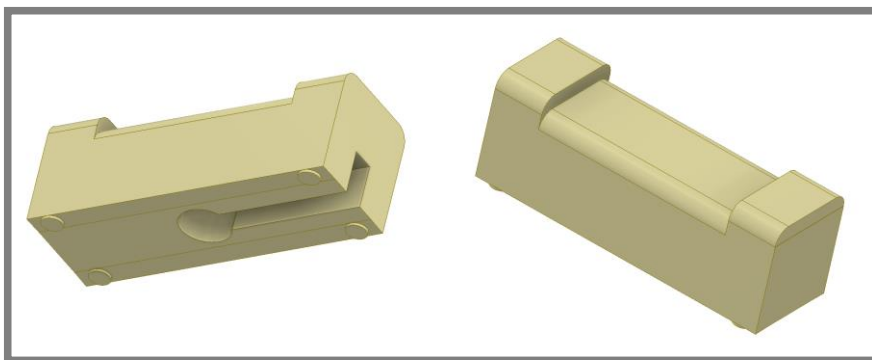
Pre zvolené spôsoby montáže snímačov akustickej emisie boli spracované konštrukčné návrhy prípravkov, ktoré majú za úlohu uchytenie snímača a jeho pritláčanie o povrch pružinou alebo elastickou penou. Slúžia tiež na tvarové prispôsobenie zostavy pre uchytenie na prísavku alebo popruh (samotný snímač je malý a tvarovo nevhodný pre priame opásanie popruhom alebo pripevnenie na prísavku).

Hlavné problémy, ktoré boli riešené sú konzistentná pritlačná sila na snímač a čo najjednoduchšia montáž a demontáž prípravku so snímačom na povrch.

### 4.1 Montáž pomocou popruhov

4.1

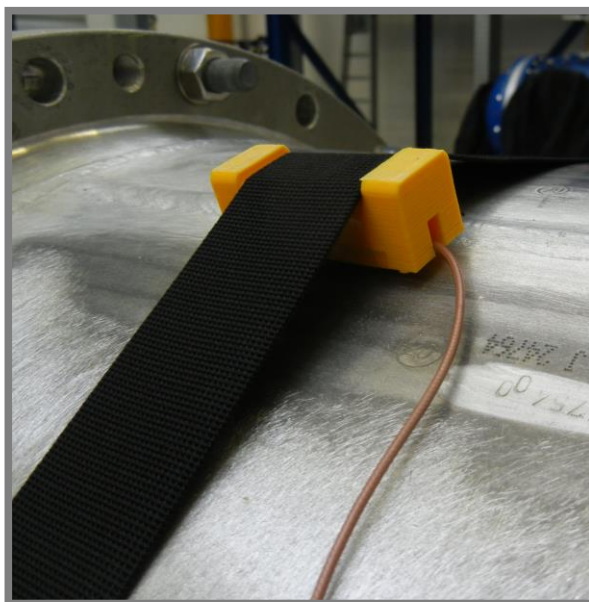
Prvý návrh konštrukčného riešenia prípravku pre montáž snímača pomocou popruhu je pomerne jednoduchý. Jedná sa o kváder dostatočne dlhý na to, aby mohol byť celý obopnutý popruhom, v ktorom je otvor na spodnej strane slúžiaci na vloženie snímača s elastickou penou. Pena je vložená na dno otvoru, pri pritlačení prípravku o povrch je stláčaná medzi vrchnou plochou puzdra snímača a dnom otvoru, takže pôsobí na snímač pritlačnou silou. V boku držiaku je drážka, ktorou je vedený koaxiálny kábel od snímača.



Obr. 4.1-1 Návrh prípravku pre montáž popruhom 1

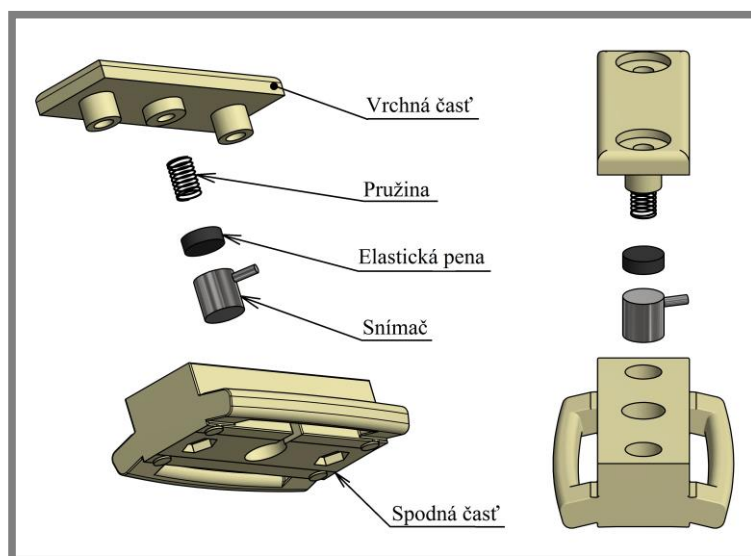
Na stranách vrchnej plochy prípravku sú výstupky, ktoré lemujú dosadaciu plochu pre popruh a zabezpečujú, aby popruh počas montáže neskĺzol dole z prípravku. Malé výstupky na spodnej ploche slúžia na lepšie dosadenie prípravku na valcovú plochu na meranom objekte.

Nedostatkom tejto konštrukcie je čiastočne nepresnosť práce s elastickou penou, ktorej keď je na dne otvoru málo, tak nepôsobí dostatočnou pritlačnou silou na snímač. Naopak keď jej je príliš veľa, tak pritláča snímač príliš veľkou silou, ktorá spôsobuje nadvihnutie celého prípravku z povrchu, kedy priamo na snímač pôsobí aj prítlak popruhu a celý prvok je mechanicky nestabilný. Vhodnejšie by bolo, keby prípravok zostal vždy pritlačený o povrch.



Obr. 4.1-2 Testovanie prípravku pre montáž popruhom 1

Druhý konštrukčný návrh je založený na rovnakom princípe s cieľom vylepšiť predchádzajúci prípravok. Jedná sa o zložitejší, sofistikovanejší úchyt, ktorý pre pritlačenie využíva aj tlačnú pružinu. Pre vedenie popruhu sú dva bočné úchyty, ktorými popruh prechádza po bokoch prípravku. Vrchná časť je rozdelená na dve súčiastky, ktoré sa voči sebe môžu posúvať, vedené v dvoch valcových uloženiach. Otvor na snímač je priechodzí cez spodnú časť, pritlačná pružina tak dosadá na vrchný kryt. Spodná časť dosadá na povrch a vrchná je na ňu dotláčaná popruhom tak, že ak sila vyvolaná pružinou a penou bude vysoká, tak dôjde iba k nadvihnutiu vrchnej časti bez straty kontaktu medzi spodnou časťou a povrchom. Pena má za úlohu najmä tlmiť vibrácie, ktorými by mohla rezonovať pružina a vibrácie, ktoré by inak mohli byť prenesené z vrchnej časti prípravku na snímač ak by pružina dosadala priamo na vrchné čelo snímača.

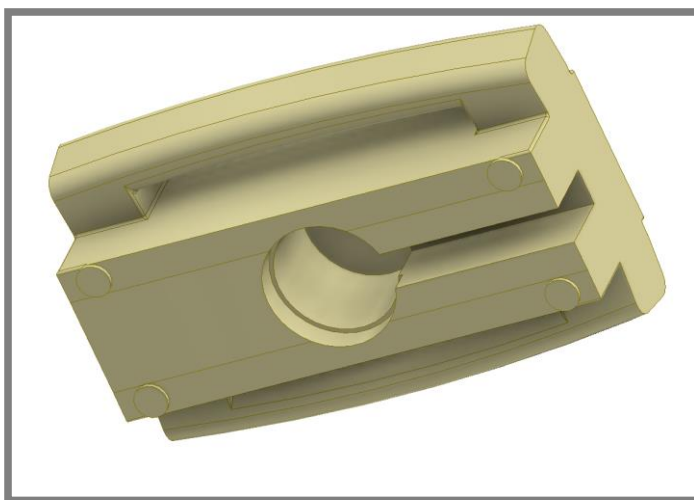


Obr. 4.1-3 Návrh prípravku pre montáž popruhom 2



Tento návrh prináša isté vylepšenia, ale je zbytočne zložitý. Problematická je aj drážka pre vedenie káblu od snímača, ktorá pri tomto návrhu musela byť umiestnená na plochu kadiaľ je vedený popruh a nie je okolo neho dostatok miesta.

Tretí návrh bol konštruovaný ako kombinácia prvých dvoch variant tak, aby nebol zbytočne komplikovaný a aby spájal výhody oboch riešení. Tento prípravok je opäť iba z jedného kusu. Z druhého návrhu sú ponechané bočné úchyty pásu, ktoré sú zdvihnuté k vrhnej hrane, aby spodná časť prípravku nedosadla na povrch popruhom, vedeným popod úchyty. Vývod káblu od snímača je vedený mimo popruh tak ako pri prvom návrhu.



Obr. 4.1-4 Návrh prípravku pre montáž popruhom 3

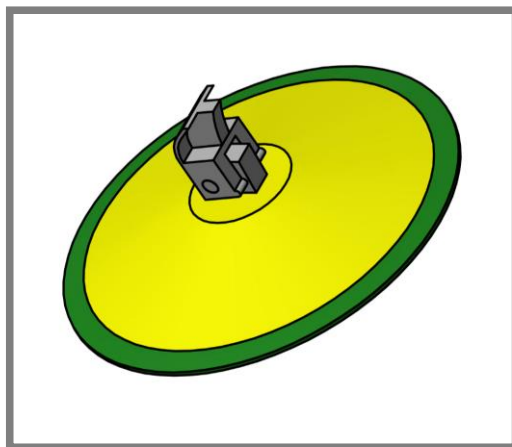
Tento úchyt bol navrhnutý pre väčší snímač, konkrétne Dakel typ IDK-14, ktorý má priemer nerezového puzdra 14mm, výšku 6mm a dotykovú plochu o priemere 11mm.



Obr. 4.1-5 Pohľad na spodnú časť rôznych prípravkov

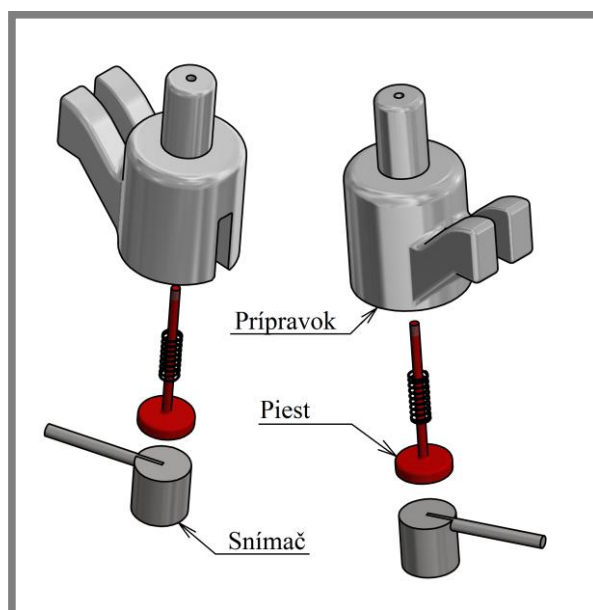
## 4.2 Montáž pomocou prísaviek

Prípravok pre uchytene snímača na prísavku, ktorá ho drží na povrchu musí byť v prvom rade s touto prísavkou kompatibilný. Spoj zabezpečuje tvarový prvok, ktorý je daný zakúpenou prísavkou, do ktorého musí prípravok zapadať ako protikus. Dohromady potom môžu byť zlepené prípadne spojené stavením plastov.



Obr. 4.2-1 Použitý typ prísavky

Prvý konštrukčný návrh prípravku je veľmi jednoduchý a principiálne rovnaký ako úchyty pre použitie s popruhom. Samotný prípravok sa skladá z niekoľkých častí. Prvou je tvarový úchyt zapadajúci do prípojky na prísavke, ďalšou je samotné puzdro. Na vyvinutie pritlačnej sily bol použitý rovnaký koncept, takže snímač klzajúci v otvore s bočnou drážkou pre vývod káblu a pritlačnou pružinou. Nevýhodou použitia pružiny oproti elastickej pene je to, že elastická pena sa dá jednoducho vtlačiť na dno otvoru a už tam sama drží, ale pružina vypadáva von, čo je pri opakovanej montáži veľmi nepraktické a neefektívne.

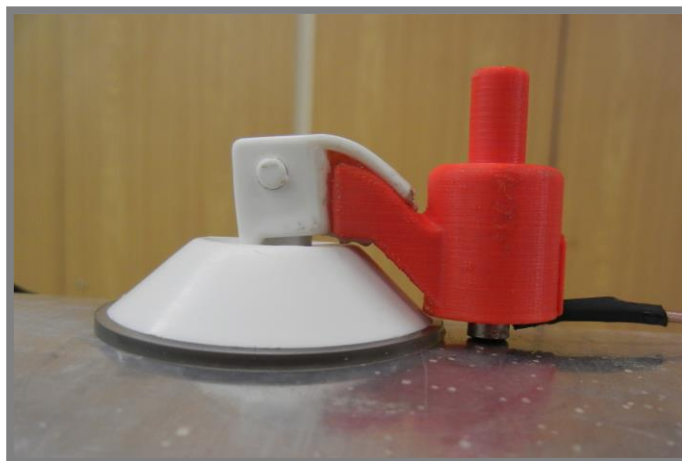


Obr. 4.2-2 Zostava prípravku pre montáž na prísavku



V druhom návrhu bol pridaný piest, ktorý má za úlohu zabezpečiť, aby pružina držala na svojom mieste.

Piest slúži ako trň pre prítlačnú pružinu, ktorá je stláčaná medzi puzdrom a čelnou časťou piestu. Pružina pôsobí na piest prítlačnou silou, a ten tlačí snímač na povrch. Na druhom konci piestu je závit, ktorý vystupuje vrchnou časťou puzdra von a môže tak byť poistený maticou. V prípade, kedy už sa nejedná iba o skúšobné meranie je možné snímač prilepiť na čelo piestu a zabezpečiť, že ani on nebude vypadávať von z prípravku pri montáži a demontáži a to je značná výhoda tohto návrhu.



Obr. 4.2-3 Nainštalovaný montážny prípravok s prísavkou

Pri použití podobných prísaviek sa opakovane vyskytoval problém s ich dlhodobou adhéziou – pri inštalácii prísavky držia veľkou silou ale po čase sa samé uvoľnia. Tento problém môže byť zapríčinený použitím prísavky príliš veľkého priemeru pre dané zaoblenie povrchu. Pomalé uvoľňovanie môže zapríčiňovať aj mechanická povaha upínacieho prípravku, ktorá nepôsobí na prísavku čisto axiálnou silou.

Na trhu existuje obrovské množstvo druhov a konkrétnych typov prísaviek, ktoré sa líšia tvarom, veľkosťou, materiálom a hlavne ich cieľovou aplikáciou. Najrozšírenejšie použitie v priemysle majú pre uchytenie súčiastok pre ľahšiu manipuláciu – pneumatické prísavky využívané v automatizačnej technike. Tento typ nie je určený pre montáž na povrch pritlačením (v dôsledku axiálnej sily sa prísavka deformuje, vytláča spod seba vzduch za vzniku podtlaku, ktorý prísavku drží na povrchu) ale na aplikáciu priložením k povrchu a pneumatickým odsatím vzduchu cez úchyt. Všeobecne majú výstup vo forme fittingu pre pneumatický rozvod, ktorý slúži súčasne na ich montáž. Sila prísavky je daná jej veľkosťou, tvarom a hlavne veľkosťou umelo vytvoreného pneumatického podtlaku.

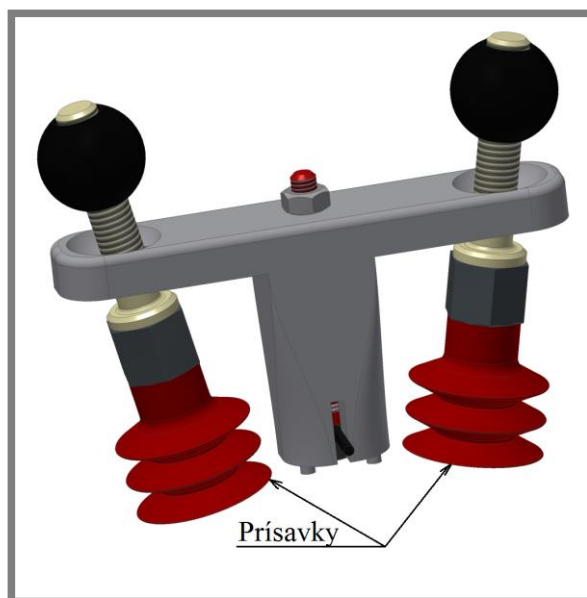
Riešením problému so zakrivením povrchu by bol výber správnej veľkosti prísavky pre daný polomer zaoblenia valcového či guľového povrchu. Kvôli rozmanitosti vlastností rôznych prísaviek sa nedá určiť jednoznačná a univerzálna závislosť priemeru prísavky určenej na rovný povrch a polomeru zaoblenia plochy, na ktorej sa dá ešte použiť. Niektorí výrobcovia udávajú maximálne zakrivenie povrchu pre konkrétny typ výrobku, nie je to však pravidlom ani to nie je bežné.

Efektívnejším riešením je použitie prísaviek, ktoré sú priamo určené pre aplikáciu na zakrivené povrchy – vlnovcové prísavky. Rozdiel je v tom, že majú menší priemer aj pre väčšie adhézne sily, ktoré sú zabezpečené tým, že ich telo je odstupňované – majú tak väčší zdvih. Využiť by sa dali aj podlhovasté oválne prísavky, ktoré by neboli až tak ovplyvnené zakrivením valcového povrchu, ak by boli namontované rovnobežne s osou potrubia. Pre montáž na guľový povrch kolien je však oválna prísavka ešte nevhodnejšia ako okrúhla.



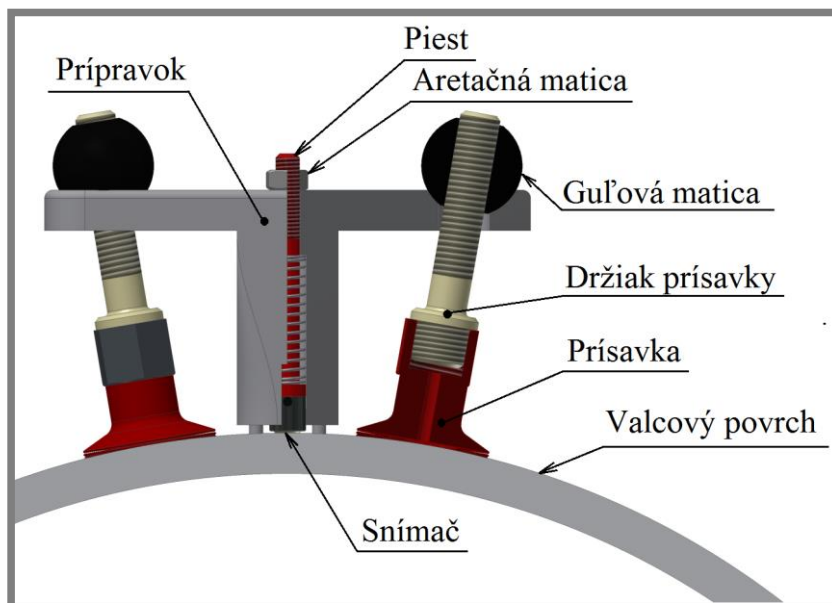
Obr. 4.2-4 Otvorené prísavky (vľavo) [39] a vlnovcové prísavky (vpravo) [40]

Ďalší návrh bol prispôsobený tak, aby riešil nedostatky predchádzajúcej konštrukcie – budú použité dve prísavky menšieho priemeru určené na zakrivené povrchy. Prísavky použité pre tento návrh sú od nemeckej firmy Schmalz, typ FSG 32 NK-45 G1/4-IG – priemer 32 mm. [41]



Obr. 4.2-5 Dvojprísavkový systém pred montážou

Daný typ prísavky je určený na pneumtické odsatie vzduchu, ale po zatesnení výstupného otvoru budú môcť byť aplikované na povrch iba manuálnym pritlačením. Zachovaný zostane princíp pritláčania snímača k povrchu pomocou malého piestu s tlačnou pružinou.



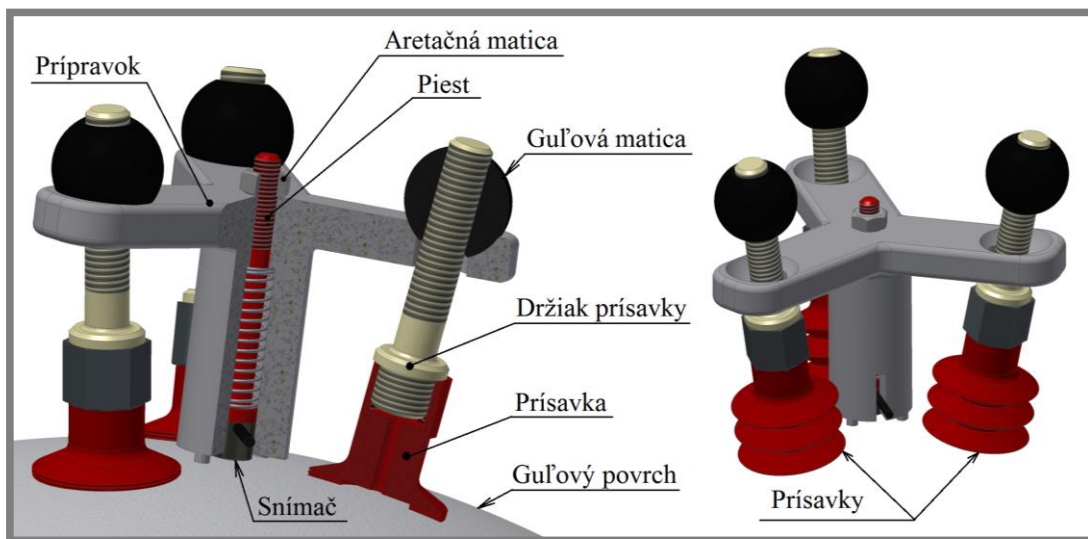
Obr. 4.2-6 Dvojprísavkový systém aplikovaný na povrch

Konštrukcia bola navrhnutá tak, aby bolo možné prípravok použiť pre valcové a guľové plochy priemerov od cca 250 mm až po rovné plochy. Prípravok s pritlačným systémom pre snímač je fixovaný na povrchu párom skrutiek, ktoré slúžia ako konštrukčný adaptér a držiak prísaviek. Jeden koniec držiaku je zaskrutkovaný do prísavky po tesniacu prírubu a druhý do guľovej matice dosadajúcej na vnútornú guľovú plochu na prípravku. Guľové matice umožňujú stabilný kontakt s prípravkom počas naklápania držiakov s prísavkami, môžu slúžiť aj ako rukoväte pre jednoduchšiu demontáž prísaviek. Naklápanie umožňuje montáž na vonkajšie aj vnútorné povrchy rôznych priemerov.

Snímač môže byť k piestu prilepený poskytujúc výhodu pri montáži aj demontáži, keďže tak tvorí s montážnym prípravkom celok. Výhodou tohto riešenia je aj možnosti pritlačenia snímača kolmo na povrch až po spoľahlivej fixácii prípravku a to povolením aretačnej matice. Dosadenie prípravku na povrch výstupkami na spodnom čele zaručuje rovnaké stlačenie pružiny a tým konzistentnú pritlačnú silu okolo 10 N, ktorá môže byť upravená napr. použitím pružiny s inými parametrami. Ďalšou kladnou vlastnosťou je, že sila na prísavky pôsobí axiálne. Navyše je rozdelená medzi dve, ktoré tak nemusia byť také veľké a dobre sa zatesnia na zakrivenom povrchu aj menších polomerov. Použitie vlnovcových prísaviek zaručuje spoľahlivý kontakt s povrchom.

Nevýhodou tohto návrhu je komplikovanosť a veľké rozmery, ktoré sú dané vysokým zdvihom vlnovcových prísaviek. Veľká výška montážneho prípravku môže viesť k nestabilite v bočnom smere.

Posledný návrh konštrukčného riešenia upínania snímačov akustickej emisie na valcový neferomagnetický povrch je principiálne identický s predchádzajúcim, jediný rozdiel je v tom, že namiesto dvoch využíva tri prísavky na ramenách so vzájomným uhlom 120°.



Obr. 4.2-7 Upínací systém s tromi prísavkami aplikovaný na povrch (vľavo) a voľný (vpravo)

Tretie rameno s prísavkou bolo pridané s účelom stabilizovať prípravok na povrchu. Systém je rovnako ako jeho predchádzajúca verzia nastaviteľný s naklápacími držiakmi prísaviek čo zabezpečuje možnosť univerzálneho použitia na povrchoch s rôznymi polomermi zakrivenia. Vďaka použitiu troch prísaviek, medzi ktoré sa rozdeľuje sila držiaca prípravok na povrchu je tento systém ešte spoľahlivejší, dá sa použiť aj pre vyššie pritlačné sily ako je nominálnych 10 N.

Nastaviteľnosť prípravku zaručuje univerzálnosť jeho použitia spolu viacerými možnými postupmi montáže. Jeden možný postup aplikácie tohto systému je:

- Vo počiatočnom stave sú gul'ové matice povolené na koniec závitových tyčí držiakov prísaviek, aretačná matica je dotiahnutá tak, aby dotyková plocha snímača nepresahovala výstupky na čele prípravku. Na čele snímača je nanosená tenká vrstva väzobného média.
- Prípravok je položený na povrch na mieste určenom pre aplikovanie snímača v sieti.
- Prísavky sú voľne položené na povrch v takom uhle, aby naň čo najlepšie dosadli.
- Zatlačením na gul'ové matice v axiálnom smere sú prísavky aplikované na povrch.
- Gul'ové matice sú dotiahnuté pre pevné zaistenie prípravku na skúšobnom povrchu.
- Aretačná matica je postupne uvoľnená až kým je úplne voľná a tým je snímač axiálne pritlačený k povrchu stálou, vždy rovnakou silou pružiny.

Opačným postupom je prípravok z povrchu demontovaný.

### 4.3 Praktické overenie funkčnosti prípravkov

Vybrané konštrukčné varianty boli vyrobené metódou 3D tlače z ABS plastu a ich vlastnosti boli prakticky overované pri meraniach vo firme ABB s.r.o. Brno.



Obr. 4.3 Meraná zostava s rozmiestnenými snímačmi

Funkčnosť bola overovaná na niekoľkých typoch úchytovej súpravy využívajúcej pružný popruh a na prvom úchyte s prísavkou. Počas opakovaného používania boli nadobudnuté praktické skúsenosti s vlastnosťami úchytovej súpravy a efektivitou ich montáže. Všeobecne je z poznatkov možné vyhodnotiť, že inštalácia pomocou popruhov je pracnejšia, ale spoľahlivejšia, keďže prísavky sa občas uvoľňujú. Ďalšou praktickou skúsenosťou bol problém so zadieraním puzdra snímača o povrch diery, v ktorej sa má pohybovať pritláčaný elastický penou. Toto bolo zapríčinené veľkosťou vodiacej diery a drsnosťou jej povrchu v dôsledku 3D tlače diery. Snímač mal vo veľkej diere tendenciu sa vykloniť z osi následkom čoho sa hrany jeho puzdra zachytili v medzere jednotlivých vrstiev vytlačeného plastu.

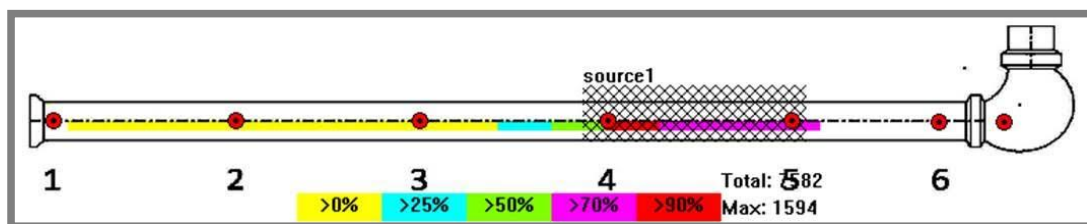
Pre meranie sú v súčasnosti využívané úchyty s jednou prísavkou, ktoré však kvôli ich nedostatkom nie sú ideálne. Na základe praktických skúseností a zhodnotenia nedostatkov boli navrhnuté ďalšie dva úchyty (s dvomi prísavkami a s tromi prísavkami), ktoré by mali zistené nedostatky odstrániť.

### 4.4 Ukážka nasnímaných dát

Účelom meraní bolo najmä lokalizovať výboje pri výstupnej skúške vodičov VVN vo forme zostáv niekoľkých segmentov spájaných prírubami. Signál bol snímaný jednorozmernou sieťou snímačov rozmiestnených po dĺžke zostavy a vyhodnocovaný modulárnym systémom XEDO a ZEDO od firmy Dakel spojenými cez rozhranie Ethernet s riadiacimi počítačmi. Systém ZEDO je najnovší typ analyzátoru od firmy Dakel, ktorý je v súčasnosti vo fáze testovania. Snímače boli pri týchto meraniach na povrch nainštalované pomocou úchytovej súpravy s jednou prísavkou. Pre účely lineárnej lokalizácie zdrojov boli vytvorené lokalizačné skupiny po dvoch snímačoch medzi ktorými boli porovnávané časové oneskorenia, s akými k nim dorazil signál jednotlivých udalostí. Výstupom je lokalizačná mapa (obr. 4.4-1)

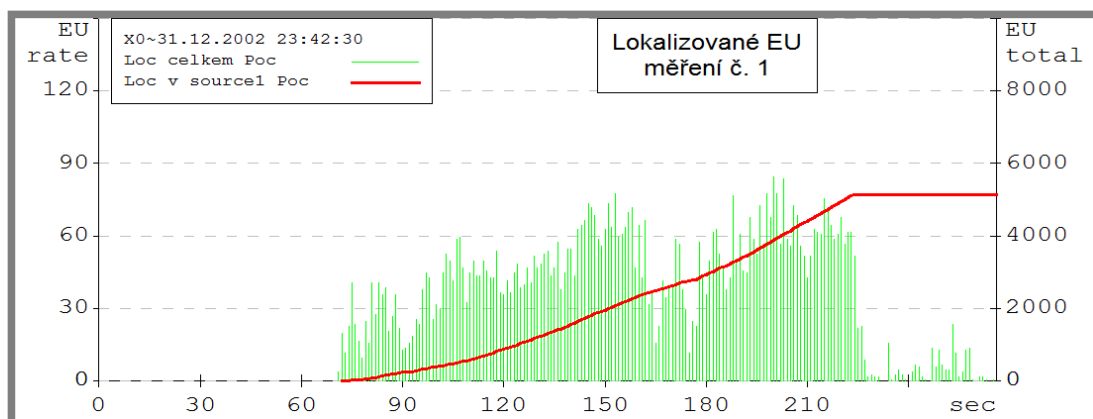


udávajúca početnosť zaznamenaných udalostí v závislosti na polohe, kde boli lokalizované.



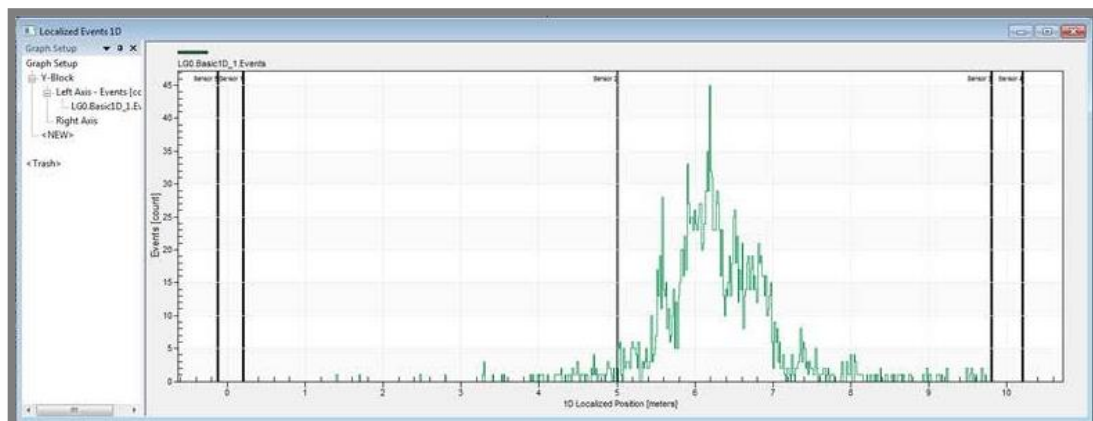
Obr. 4.4-1 Lokalizačná mapa výsledku 1. merania (systém XEDO)

Ďalším možným grafickým výstupom je časová závislosť početnosti zaznamenaných udalostí (obr. 4.4-2), ktorá ukazuje počet udalostí, ktoré sú lokalizované do jedného miesta konštrukcie za 1 sekundu.



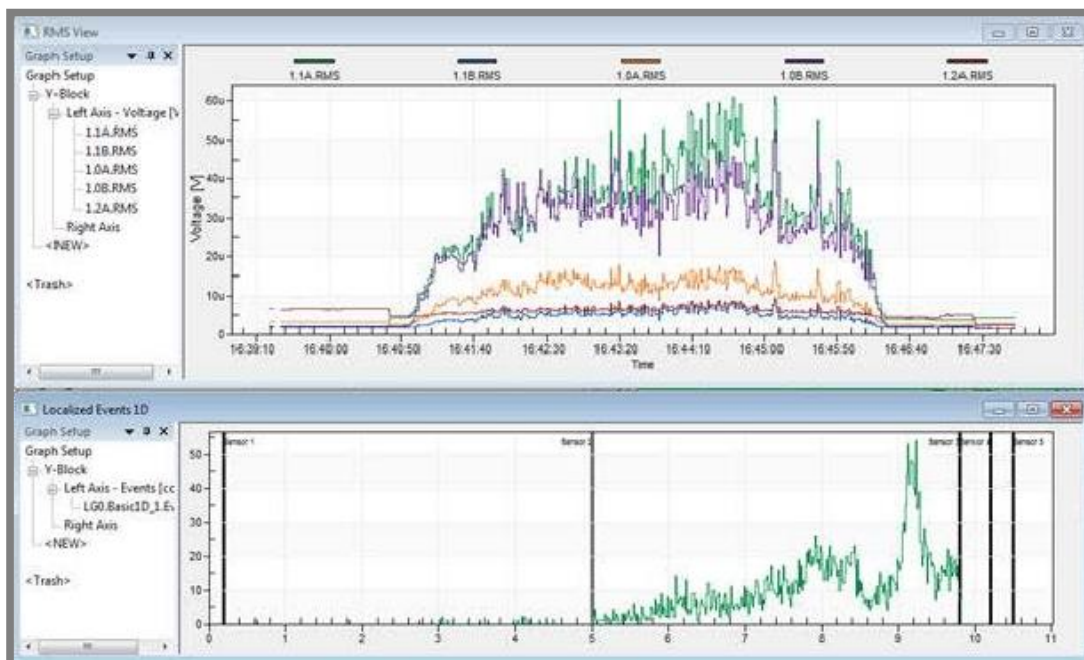
Obr. 4.4-2 Časový priebeh počtu udalostí z 1. merania (systém XEDO)

Z obrázku 4.4-1 je vidieť, že najvyššia početnosť udalostí bola zaznamenaná medzi 4. a 5. snímačom teda približne 6 m od ľavého konca zostavy. Tento výsledok bol potvrdený viacerými meraniami aj systémom ZEDO. Z výsledkov je možné vyhodnotiť, že zdroj AE sa nachádza v danom mieste a teda pravdepodobne v tomto mieste dochádza k najpočetnejším výbojom.



Obr. 4.4-3 Lokalizačná mapa z ďalšieho merania (systém ZEDO)

Na obrázkoch 4.4-3 a 4.4-4 (dole) sú ukážky lokalizačných máp z ďalších nezávislých meraní na rôznych zostavách ako výstupy zo systému ZEDO. Na obrázku 4.4-4 (dole) je tiež závislosť efektívnej hodnoty výkonu signálu RMS na čase pre jednotlivé snímače. Tento graf zobrazuje intenzitu signálu zo snímačov na rozdiel od lokalizačných máp, ktoré zohľadňujú početnosť zaznamenaných udalostí.



Obr. 4.4-4 Ukážka časového priebehu intenzity signálu (hore) a lokalizačnej mapy (dole)

## 5 DISKUSIA

V tejto bakalárskej práci boli spracované rôzne použiteľné spôsoby montáže snímačov akustickej emisie na valcový a guľový povrch potrubných segmentov z neferomagnetického materiálu. Keďže na splnenie tejto úlohy nie sú použiteľné najrozšírenejšie magnetické upínacie prípravky, bolo potrebné použiť alternatívne princípy pre uchytávanie prípravkov so snímačmi.

Ako prvé boli rozvinuté možnosti využitia elastických popruhov obopínajúcich skúšobné teleso pritláčajúc prípravok so snímačom na povrch. Tento princíp sa ukázal ako vhodný, preto bolo vyvinutých niekoľko na ňom založených montážnych prípravkov. Prvý návrh prípravku je najjednoduchší, jedná sa o tvarový prvok, ktorý prenáša silu z popruhu na snímač cez tlmiacu penu. Nevýhodou tohto návrhu je pritlačná sila, ktorá je závislá na pritlaku popruhu a presnej hrúbke tlmiacej peny a tým je ťažko opakovateľná. Výhodou je najmä konštrukčná jednoduchosť. Druhý návrh bol konštruovaný tak, aby odstránil nedostatky predošlého – bola pridaná pritlačná pružina a prípravok sa skladá z dvoch vzájomne pohyblivých častí. Táto konštrukcia vyriešila otázku pritlačnej sily, ale zložitý prípravok z viacerých častí, ktoré voči sebe nie sú nijako zaistené by bol nepraktický z hľadiska montáže, pretože by ho bolo nutné vždy najskôr zostaviť. Posledný návrh bol konštruovaný ako kombinácia predošlých – jednoduchosť prvého, koncept vedenia popruhu z druhého. Vyriešil taktiež problematický vývod káblu snímača z druhého návrhu.

Ďalší možný princíp montáže snímača je využitie pružných oceľových strmeňov v tvare písmena „C“, ktoré by boli rozťahnuté medzi vrchnou plochou snímača na a protiľahlou stranou povrchu potrubia. Tento spôsob sa ukázal ako nevhodný pre nepraktickú manipuláciu so strmeňmi s ktorou je spojená ťažká montáž a demontáž s rizikom poškodenia povrchu.

Ďalej vyvíjané montážne prípravky využívajúce podtlakové prísavky pre fixáciu prípravku so snímačom na povrchu. Prvý návrh využíva prísavky určené na rovné povrchy, koncepcne bol pridaný piest s pružinou, na ktorý je prilepený snímač a drží tak celú zostavu aj so snímačom v celku. Výhodou sa ukázala byť rýchla a jednoduchá montáž a stabilná pritlačná sila. Avšak kvôli použitiu prísaviek na rovinné plochy občas dochádzalo k samovoľnému uvoľneniu prísavky z povrchu vedúcemu k strate kontaktu medzi snímačom a povrchom. Tento problém bol vyriešený použitím priemyselných prísaviek určených na zakrivené plochy. Ďalšie dva návrhy sú v princípe rovnaké (líšia sa počtom použitých prísaviek, ktorý je 2 a 3) – jedná sa o konštrukciu s vlnovcovými prísavkami, ktoré sú naklápaťelné voči prípravku so snímačom a tak zaručujú použiteľnosť na vnútorné aj vonkajšie plochy rôznych polomerov zakrivenia. Výhodou je aj to, že vďaka použitiu viacerých prísaviek s pritlačnou pružinou pôsobiace medzi nimi sú prísavky zaťažované najmä axiálne. Ich nevýhodou je najmä komplikovanosť.

Do praxe boli nasadené prípravky založené na návrhoch využívajúcich elastické popruhy a na prvom návrhu prípravku s prísavkou. Elastické popruhy sú v porovnaní s prísavkami zložitejšie riešenie na montáž a použitie jednej prísavky určenej na rovné plochy sa ukázalo ako nie úplne spoľahlivé, preto by bolo vhodnejšie použiť posledné návrhy prísavkových upínačov, ktoré tieto nedostatky odstraňujú. Trojprísavkový systém predstavuje spoľahlivé riešenie problému montáže snímačov na zaoblený neferomagnetický povrch.



## 6 ZÁVER

---

## 6

Nedeštruktívne testovanie je v technickej praxi nevyhnutné pre bezpečnosť a ekonomiku výrobných a prevádzkových procesov. Metóda akustickej emisie je výrazne odlišná od konvenčných defektoskopických metód najmä faktom, že deteguje iba aktívne deje a procesy v reálnom čase. Táto a všetky ostatné vlastnosti danej metódy sú podkladom pre jej rôznorodé a špecifické aplikácie, ktorých ciele by boli často ťažko dosiahnuteľné iným spôsobom. V prvej kapitole tejto bakalárskej práce bol spracovaný prehľad nedeštruktívneho testovania, zvláštna pozornosť je venovaná metóde akustickej emisie, ktorá je spracovaná v postupnosti celého merania, techniky a popisu jej možných aplikácií.

Pre relevantné meranie akustickej emisie je nevyhnutný spoľahlivý kontakt snímača s povrchom, ktorý je zabezpečený metódou jeho montáže. Táto práca poskytuje prehľad princípov štandardne používaných pre montáž snímačov a používané médiá akustickej väzby s povrchom. Pre zadané podmienky upínania na neferomagnetický zakrivený povrch boli skonštruované viaceré návrhy použiteľných montážnych systémov a boli posúdené ich vlastnosti.

Výsledkom tejto bakalárskej práce je konštrukčný návrh trojprísavkového upínacieho systému spĺňajúci požiadavky zadania na rýchlu a spoľahlivú montáž. K tomuto návrhu bola spracovaná výkresová dokumentácia obsiahnutá v prílohách. Pri ďalšej práci v tejto oblasti by mala byť venovaná pozornosť najmä zjednodušeniu navrhnutých systémov a redukcii ich fyzických rozmerov.

## 7 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

---

- [1] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] STN EN ISO 9712. *Nedeštruktívne skúšanie. Kvalifikácia a certifikácia pracovníkov nedeštruktívneho skúšania*. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo Slovenskej republiky, 2012.
- [3] SNT-TC-1A. Personnel qualification and certification in nondestructive testing. Columbus, OH: The American Society for Nondestructive Testing, 2006. ISBN-13: 978-1-57117-143-6
- [4] KOPEC, Bernard a Bohumil BRODSKÝ. *Nedestruktivní zkoušení: defektoskopie*. 2. doplněné vydání. Brno: Česká společnost pro nedestruktivní testování, 2015, 32 s. ISSN 1213-3825.
- [5] Vizuálna kontrola. *ATG Slovakia* [online]. Trenčín [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.atg.sk/ndt-161&display=VT>
- [6] Kapilárne skúšanie. *ATG Slovakia* [online]. Trenčín [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.atg.sk/ndt-141&display=PT>
- [7] Liquid penetrant testing. *INTREX* [online]. 2016 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.intrekw.com/Home/OurServices/Non-Destructive-Testing/Dye-Penetration-Testing>
- [8] Magnetická prášková metóda. *ATG Slovakia* [online]. Trenčín [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.atg.sk/ndt-131&display=MT>
- [9] Eddy current measurement technology. *ROSEN Group* [online]. 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.rosen-group.com/global/company/explore/we-can/technologies/measurement/eddy-current.html>
- [10] Metóda vírivých prúdov. *ATG Slovakia* [online]. Trenčín [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.atg.sk/ndt-151&display=ET>
- [11] Rádiografická metóda. *ATG Slovakia* [online]. Trenčín [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.atg.sk/ndt-111&display=RT>
- [12] Ultrazvuková metóda. *ATG Slovakia* [online]. Trenčín [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.atg.sk/ndt-121&display=UT>
- [13] Acoustic Emission Testing. *Vrije Universiteit Brussel dept.MECH* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage\\_testing\\_prevention\\_and\\_detection\\_in\\_aeronautics/PDF/acoustic-emission.pdf](http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage_testing_prevention_and_detection_in_aeronautics/PDF/acoustic-emission.pdf)
- [14] Diagnostická metóda akustické emisie a jej perspektivy. *Tech Magazín* [online]. 2011 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/85>
- [15] AE Calibration and Simulators: Signal Source. In: *Acoustic Technology Group* [online]. 2002 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.atgndt.com/ae-calibration-and-simulators/calibration-signal-source/>
- [16] Huygen's Principle In: *Physicsmax* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://physicsmax.com/huygens-principle-4868>
- [17] Mechanické Vlnění. *Webfyzika.fsv.cvut* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/vlneni\\_mechanika.pdf](http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/vlneni_mechanika.pdf)

- [18] Acoustic Emission Equipment. *NDT Resource center* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Equipment.php](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Equipment.php)
- [19] Analyzátor. *Dakel.cz* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/dev/xedo>
- [20] AE sinal features. *NDT Resource center* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Signal%20Features.php](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Signal%20Features.php)
- [21] VALLEN, Hartmut. AE Testing Fundamentals, Equipment, Applications. In: *NDT Resource center* [online]. 2002 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>
- [22] MILLER, Ronnie K, Eric v. K HILL a Patrick O MOORE. *Acoustic emission testing*. 3rd ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005, 446 s. ISBN 1-57117-106-1.
- [23] CANEVA, C, I.M. DE ROSA a F. SARASINI. *Acoustic Emission Monitoring Of Flexurally Loaded Aramid/Epoxy Composites By Embedded PVDF Sensors*. Journal of Acoustic Emission [online]. **2007**(25), s. 80-91. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/jae/papers/25-080.pdf>
- [24] Piezo Film Sensors Technical Manual. *Measurement Specialties, Inc.* [online]. Norristown, PA, 1999, [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/MSI-techman.pdf>
- [25] LUO, M., D. LIU a H. LUO, PASSARO, V.M.N., ed. *Real-Time Deflection Monitoring for Milling of a Thin-Walled Workpiece by Using PVDF Thin-Film Sensors with a Cantilevered Beam as a Case Study* [online]. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, 2016 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1470/htm>
- [26] SCRUBY, C.B. a H.M.G. WADLEY. *A calibrated capacitance transducer for the detection of acoustic emission*. Journal of Physics D: Applied Physics [online]. **1978**(11), s. 1487-1494. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [http://128.143.22.36/ms/research/wadley/Documents/Publications/A\\_Calibrated\\_Capacitance\\_Transducer.pdf](http://128.143.22.36/ms/research/wadley/Documents/Publications/A_Calibrated_Capacitance_Transducer.pdf)
- [27] OZEVIN, D., D.W. GREVE, I.J. OPPENHEIM a S.P. PESSIKI. Resonant capacitive MEMS acoustic emission transducers. *Smart Materials and Structures* [online]. 14 s. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://users.ece.cmu.edu/~dwg/research/smart%20struc%20ae.pdf>
- [28] KEPRT, Jiří. *Primární kalibrace snímačů akustické emise*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 171 s. Vedúci dizertačnej práce doc. Ing Petr Beneš, PhD.
- [29] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav: *Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu*. BEN-Technická literatura, Praha, 2006, 410 s. ISBN 80-7300-158-6

- [30] ZAKHAROV, D.A., S.N. PTICHKOV a V.V. SHEMYAKIN. Acoustic emission signal attenuation in the waveguides used in underwater AE testing. *10th European Conference on Non-Destructive Testing Report I.7.19* [online]. 2010, 12 s. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_07\\_19.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_19.pdf)
- [31] BANČÁK, M. *Snímání signálu akustické emise s využitím vlnovodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc..
- [32] THEOBALD, P., B. ZEQUIRI a J AVISON. Couplants And Their Influence On AE Sensor Sensitivity. *Journal of Acoustic Emission* [online]. **2008**(26), S. 91-97 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/jae/papers/26-091.pdf>
- [33] ASTM E650 / E650M-12, *Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012,
- [34] Acoustic Emission Sensors Specification. *Vallen Systeme GmbH* [online]. 2015 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.vallen.de/zdownload/pdf/sov1507.pdf>
- [35] AE Accessories: Magnetic Sensor Holders. *Acoustic Emission Group* [online]. 2014 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.atgndt.com/ae-accessories/ae-accessories-magnetic-sensor-holders/>
- [36] Acoustic Emission Mechanical Sensor Holder. *Bangos* [online]. 2016 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.bangos.eu/acoustic-emission-mechanical-sensor-holder/>
- [37] Magnetic Hold Downs. *Physical Acoustics* [online]. 2017, [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.physicalacoustics.com/by-product/magnetic-hold-downs/>
- [38] Snímač AE typ IDK-09. *Dakel* [online]. 2017 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens/idk09>
- [39] Nové prisavky od HrTech s.r.o. na plastové diely a iné materiály. *Plastic Portal .eu* [online]. 2016 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.sk/sk/nove-prisavky-od-hrtech-sro-na-plastove-dily-a-jine-materialy/c/2384>
- [40] Vákuové prisavky a príslušenstvo. *Awas s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://awas-ba.sk/produkty/morali-vactec-systems/morali-vakuove-prisavky-a-prislusenstvo/>
- [41] Bellows suction cup datasheet. *J. Schmalz GmbH* [online]. 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/vacuum-suction-cups/bellows-suction-cups-round/bellows-suction-cups-fsg-2-5->

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN 8

|              |  |
|--------------|--|
| NDT          | - (z angl. <i>non-destructive testing</i> ) nedeštruktívne testovanie materiálov   |
| VT           | - (z angl. <i>visual testing</i> ) vizuálna metóda   |
| PT           | - (z angl. <i>penetrant testing</i> ) kapilárna metóda   |
| MT           | - (z angl. <i>magnetic particle testing</i> ) magnetická metóda práškova   |
| ET           | - (z angl. <i>eddy current testing</i> ) metóda vírivých prúdov  |
| RT           | - (z angl. <i>radiography testing</i> ) skúšanie prežarováním  |
| UT           | - (z angl. <i>ultrasonic testing</i> ) ultrazvuková metóda   |
| AE           | - (z angl. <i>acoustic emission</i> ) akustická emisia   |
| PZT          | - (z angl. <i>lead zirconate titanate</i> ) tuhý roztok olova, zirkónu a titánu  |
| PVDF         | - Polyvynildénfluorid  |
| EMAT         | - (z angl. <i>electro-magnetic acoustic transducers</i> ) Elektromagneto- akustické snímače                                    |
| RMS          | - (z angl. <i>root mean square</i> ) efektívna hodnota energie signálu   |
| ASL          | - (z angl. <i>average signal level</i> ) stredná úroveň absolútnej hodnoty úrovne signálu                                      |
| NC           | - (z angl. <i>number of counts</i> ) počet prekmitov signálu nad nastavenú prahovú hodnotu                                     |
| TH           | - (z angl. <i>threshold</i> ) prah detekcie signálu  |
| $\Delta$ ETH | - (z angl. <i>end threshold</i> ) časový úsek od posledného prekročenia prahu detekcie signálu po skončenie hitu               |
| $\Delta$ STH | - (z angl. <i>separation threshold</i> ) časový úsek od posledného prekročenia prahu detekcie po začiatok snímania nového hitu |
| TI           | - (z angl. <i>time of initialization</i> ) čas prvého prekročenia prahu detekcie   |
| TE           | - (z angl. <i>time of end</i> ) čas posledného prekročenia prahu detekcie  |
| TM           | - (z angl. <i>time of maximal amplitude</i> ) čas dosiahnutia maximálnej amplitúdy hitu  |
| AM           | - (z angl. <i>maximal amplitude</i> ) maximálna amplitúda hitu   |
| RST          | - (z angl. <i>risetime</i> ) doba nábehu   |
| RDT          | - (z angl. <i>ringdown time</i> ) doba doznievania hitu  |
| DRT          | - (z angl. <i>duration</i> ) trvanie hitu  |
| ABS          | - akrylonitrilbutadiénstyren   |
| VVN          | - veľmi vysoké napätie   |

## 9 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

|   |    |
|---|----|
| <b>Obr. 1.1.5-1</b> Princíp metódy PT [7]   | 16 |
| <b>Obr. 1.1.6-1</b> Princíp metódy MT [8]   | 17 |
| <b>Obr. 1.1.7-1</b> Princíp metódy ET [9]   | 17 |
| <b>Obr. 1.1.8-1</b> Princíp metódy RT [11]  | 18 |
| <b>Obr. 1.2-1</b> Prenosová trasa AE A) až E) [1]                                 | 19 |
| <b>Obr. 1.2.1-1</b> Praskavý (vľavo) a spojitý (vpravo) signál AE [14]            | 20 |
| <b>Obr. 1.2.1-1</b> Hsu-Nielsenov zdroj – Pen Test [15]                           | 21 |
| <b>Obr. 1.2.6-1</b> Parametre separácie hitov signálu [1]                         | 24 |
| <b>Obr. 1.2.6-2</b> Parametre hitu [1]  | 25 |
| <b>Obr. 1.2.7-1</b> Princíp lokalizácie zdroja AE [21]                            | 25 |
| <b>Obr. 1.3.1-1</b> Časti piezoelektrického snímača [18]                          | 28 |
| <b>Obr. 1.3.2-1</b> Konštrukcia piezofilmového snímača [25]                       | 30 |
| <b>Obr. 1.3.4-1</b> Princíp činnosti EMAT snímačov [5]                            | 31 |
| <b>Obr. 1.3.6-1</b> Frekvenčná charakteristika snímača [13]                       | 32 |
| <b>Obr. 1.3.6-2</b> Odozva snímača na kalibračný $\delta$ pulz [1]                | 32 |
| <b>Obr. 1.4.4-1</b> Magnetický upínač [35]  | 35 |
| <b>Obr. 1.4.4-2</b> Upínač využívajúci ťažné pružiny [36]                         | 36 |
| <b>Obr. 1.4.4-3</b> Magnetický upínač využívajúci elastickú penu [37]             | 36 |
| <b>Obr. 2-1</b> Použitý snímač od firmy Dakel [38]                                | 38 |
| <b>Obr. 2-2</b> Skúšobný segment potrubia   | 39 |
| <b>Obr. 3.1-1</b> Schéma konceptu montáže popruhom 1                              | 40 |
| <b>Obr. 3.1-2</b> Schéma konceptu montáže popruhom 2                              | 41 |
| <b>Obr. 3.1-3</b> Schéma konceptu montáže popruhom 3                              | 41 |
| <b>Obr. 3.2-1</b> Schéma konceptu montáže pomocou prísavky                        | 42 |
| <b>Obr. 3.3-1</b> Schéma konceptu montáže pomocou strmeňa                         | 43 |
| <b>Obr. 3.4-1</b> Porovnanie konceptov montáže                                    | 43 |
| <b>Obr. 4.1-1</b> Návrh prípravku pre montáž popruhom 1                           | 45 |
| <b>Obr. 4.1-2</b> Testovanie prípravku pre montáž popruhom 1                      | 46 |
| <b>Obr. 4.1-3</b> Návrh prípravku pre montáž popruhom 2                           | 46 |
| <b>Obr. 4.1-4</b> Návrh prípravku pre montáž popruhom 3                           | 47 |
| <b>Obr. 4.1-5</b> Pohľad na spodnú časť rôznych prípravkov                        | 47 |
| <b>Obr. 4.2-1</b> Použitý typ prísavky  | 48 |
| <b>Obr. 4.2-2</b> Zostava prípravku pre montáž na prísavku                        | 48 |
| <b>Obr. 4.2-3</b> Nainštalovaný montážny prípravok s prísavkou                    | 49 |
| <b>Obr. 4.2-4</b> Oválne prísavky (vľavo) [39] a vlnovcové prísavky (vpravo) [40] | 50 |
| <b>Obr. 4.2-5</b> Dvojprísavkový systém pred montážou                             | 50 |
| <b>Obr. 4.2-6</b> Dvojprísavkový systém aplikovaný na povrch                      | 51 |
| <b>Obr. 4.2-7</b> Upínací systém s tromi prísavkami aplikovaný na povrch a voľný  | 52 |
| <b>Obr. 4.3</b> Meraná zostava s rozmiestnenými snímačmi                          | 53 |
| <b>Obr. 4.4-1</b> Lokalizačná mapa výsledku 1. merania (systém XEDO)              | 54 |
| <b>Obr. 4.4-2</b> Časový priebeh počtu udalostí z 1. merania (systém XEDO)        | 54 |
| <b>Obr. 4.4-3</b> Lokalizačná mapa z ďalšieho merania (systém ZEDO)               | 54 |
| <b>Obr. 4.4-4</b> Ukážka časového priebehu intenzity signálu a lokalizačnej mapy  | 55 |

## 10 ZOZNAM PRÍLOH

**10**

---

Výkresová dokumentácia:

|                   |  |              |
|-------------------|--|--------------|
| <b>Príloha 1:</b> | Výrobný výkres telesa prípravku          | 02-2017/5-01 |
| <b>Príloha 2:</b> | Výrobný výkres piestu pružiny            | 02-2017/5-02 |
| <b>Príloha 3:</b> | Výrobný výkres držiaku prísavky          | 02-2017/5-03 |
| <b>Príloha 4:</b> | Výrobný výkres guľovej matice            | 02-2017/5-04 |
| <b>Príloha 5:</b> | Zostavný výkres trojprísavkového upínača | 02-2017/5    |